Soudage et assemblage-soudage
Guide d'auto-apprentissage



Comité sectoriel
de la main-d'oeuvre
dans la fabrication
métallique
industrielle

Remerciements

Ce guide a été produit par le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI) en collaboration avec le Centre d'élaboration des moyens d'enseignement du Québec (CEMEQ), grâce à la contribution financière de la Commission des partenaires du marché du travail (CPMT).





Responsables du projet au CSMOFMI
Chargé de projet : Gilbert Riverin
Conseiller technique : Jean-Guy Ménard
Équipe de réalisation CEMEQ International Inc. (www.cemeq.qc.ca)
Responsable du projet : Jean-Pierre Gauthier
Coordonnateurs du projet : Ridha Ismail, Patrice Rioux
Rédacteurs : Camille Routhier, conseillère technique
Gilles Desjardins, expert de contenu
Réviseure : Katherine Hamel
Correctrice d'épreuves : Véronique Lacroix
Graphistes : Katy Carrier, Isabelle Fillion, Sébastien Fortier, Patrick Payeur
Collaborateur : Marcel Roy

Dans le présent document, la forme masculine désigne aussi bien les femmes que les hommes.

ISBN : 978-2-89620-269-0 (Centre d'élaboration des moyens d'enseignement du Québec)

ISBN : 978-2-922946-11-6 (Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle)

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2010

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives Canada, 2010

Table des matières

CHAPITRE 7 LECTURE DE PLANS ET PRÉPARATION

CHAPITRE 8 TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE : TRAÇAGE ET DÉVELOPPEMENT DE PATRONS

ANNEXES

Avant-propos

Le présent guide d'autoapprentissage se veut un complément au carnet d'apprentissage et au guide du compagnon élaborés dans le cadre du Programme d'apprentissage en milieu de travail pour les métiers de soudeur et d'assembleur-soudeur. Il vise un double objectif : d'une part, offrir à l'apprenti, qui en éprouverait le besoin, un moyen de combler certaines lacunes en ce qui a trait aux savoirs associés à son métier, et d'autre part, offrir au compagnon un document de référence pour le soutenir dans sa pratique de compagnonnage.

Le guide est divisé en 8 chapitres qui traitent des différents thèmes reliés au soudage et à l'assemblage-soudage. On y présente d'abord des notions de métallurgie (chapitre 1), pour s'intéresser ensuite aux principaux procédés de soudage manuels et semi-automatiques (chapitre 2), de même qu'aux principaux procédés de coupage, de gougeage et de chanfreinage (chapitre 4). Un chapitre est consacré aux notions de base en mathématique (chapitre 3) et un autre à la lecture de plans et à la symbolisation en soudage (chapitre 7). De même, la question de la déformation liée au soudage (chapitre 5) ainsi que la question des défauts de soudure (chapitre 6) font chacune l'objet d'un chapitre. Enfin, on aborde des techniques qui se rapportent plus spécifiquement à la fonction d'assembleur, soit le traçage des pièces et le développement de patrons (chapitre 8). Chaque chapitre contient des exercices pour aider l'apprenti à assimiler les notions abordées.

Évidemment, ce guide, à lui seul, n'est pas suffisant pour préparer un employé à travailler en soudage. Ainsi, toute la question fondamentale de la santé et de la sécurité du travail a été évacuée, puisqu'elle doit faire l'objet d'une formation spécifique de la part de l'employeur. En fait, ce guide est avant tout un document de support destiné à l'apprenti désireux d'approfondir la connaissance de son métier et d'améliorer sa pratique. Ultimement, cependant, ce sont les compagnons qui demeurent responsables de la transmission des savoirs et des savoir-faire reliée à l'exercice de la profession. Aussi, les questions supplémentaires suscitées par ce guide devraient-elles leur être adressées.

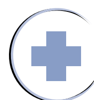
Repères visuels


Saviez-vous que.

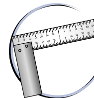

Exercice visant à mettre à l'épreuve vos connaissances. Vérifiez vos réponses à l'aide du corrigé.



Notion à se rappeler.


Mesure de santé et de sécurité à observer.


Consigne particulière de travail, mise en garde ou truc du métier.


Section spécifique aux assembleurs-soudeurs.

Chapitre 1 MÉTALLURGIE

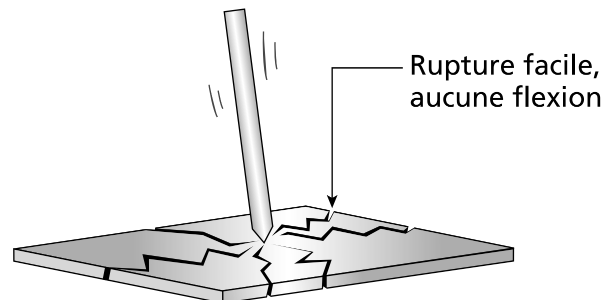
Le travail du soudeur s'effectue sur une vaste gamme de métaux. Afin d'être en mesure de choisir ou de justifier le choix d'un procédé de soudage et d'un métal d'apport approprié, on doit évidemment connaître les propriétés et la soudabilité de la pièce à souder. C'est là que des notions de métallurgie trouvent toute leur utilité. Ce premier chapitre propose donc un aperçu des propriétés physiques de différents métaux et présente, plus particulièrement, les métaux les plus communément soudés.

Propriétés des métaux

Les métaux se distinguent en fonction de différentes caractéristiques qui leur confèrent des propriétés spécifiques. Celles-ci déterminent non seulement leur soudabilité, mais aussi la fonction du métal dans un assemblage.

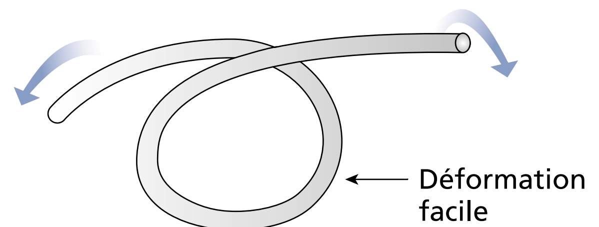
Fragilité

La fragilité désigne la caractéristique d'un métal qui se brise facilement sous l'effet d'un choc ou d'une déformation. Il se déforme peu ou pas du tout, et se casse facilement.



Ductilité

À l'opposé, la ductilité représente la capacité d'un métal à se déformer sans se rompre. Il peut être étiré, allongé ou soumis à des forces de torsion. Les matériaux ductiles sont difficiles à casser parce que les fissures ou les défauts créés par une déformation se propagent difficilement.



Ténacité

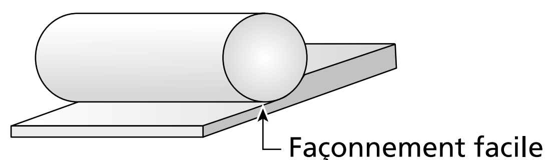
La ténacité correspond à la capacité des matériaux à résister aux chocs sans se briser ni s'écailler. Les marteaux et les équipements utilisés pour déformer ou couper des plaques d'acier (matrices, poinçons, etc.) sont constitués de matériaux de haute ténacité.



Malléabilité

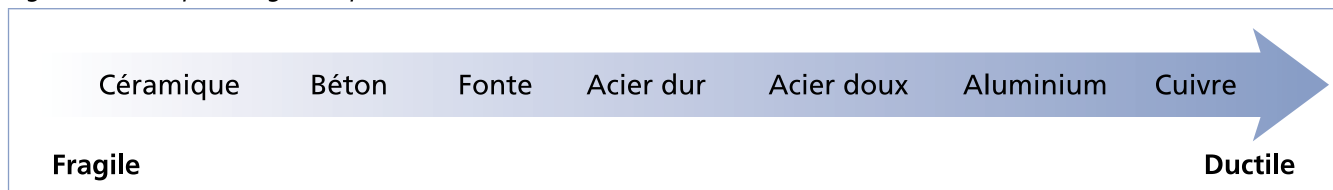
La malléabilité est une caractéristique qui permet au métal de se laisser façonner. Elle réfère à la résistance relative du métal soumis à des forces de compression, comme le forgeage ou le laminage. Un exemple de matériel extrêmement malléable, quoique non soudable, est la pâte à modeler.

Notons que la malléabilité d'un matériau croît avec l'augmentation de la température.



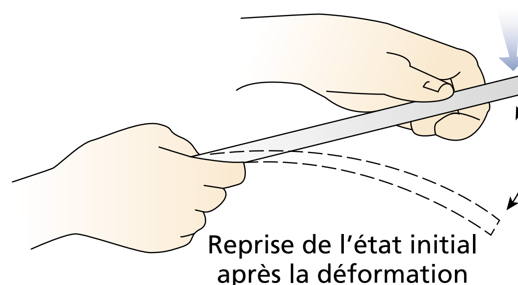
En soudage, on travaille généralement avec des matériaux ductiles et malléables. La figure 1.1 présente certains matériaux en fonction de leur ductilité/malléabilité.

Figure 1.1 Du plus fragile au plus ductile



Élasticité

L'élasticité désigne la capacité d'un matériel à reprendre sa forme originale après avoir subi une déformation. C'est le cas typique d'un ressort qu'on étire puis qu'on relâche.



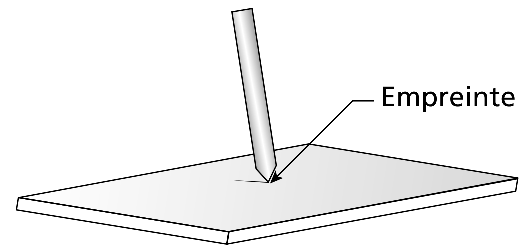


Saviez-vous que…

La plupart des métaux sont élastiques jusqu'à un certain niveau de déformation. Dépassé cette limite, les métaux demeurent déformés en permanence même en enlevant la force exercée; on parle dans ce cas d'une déformation plastique ou irréversible. À la suite d'une déformation encore plus importante, les métaux peuvent subir des ruptures.

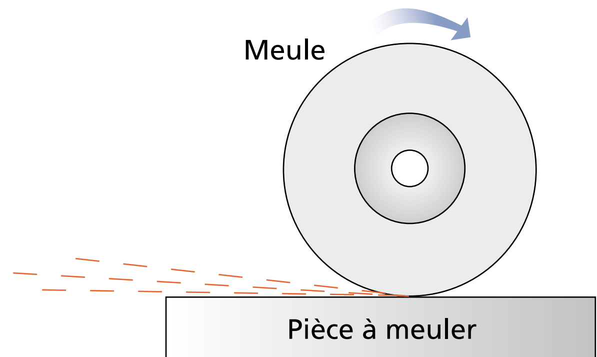
Dureté

La dureté est la capacité d'un corps à résister à la pénétration d'un corps plus dur que lui. Elle se caractérise aussi par sa résistance aux rayures. Le diamant constitue le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, un peu moins, et l'aluminium est de faible dureté.



Résistance à l'abrasion

Les matériaux durs présentent aussi une bonne résistance à l'abrasion, c'est-à-dire qu'ils ne s'usent pas facilement par frottement. En termes pratiques, ils sont plus difficiles à meuler.



Résistance à la corrosion

La résistance à la corrosion désigne la capacité d'un matériau à ne pas se dégrader sous l'effet de la combinaison chimique de l'oxygène et du métal. Un métal ferreux résistant à la corrosion ne rouille pas ; c'est le cas des aciers inoxydables et de certains autres aciers d'alliage.



Magnétisme

Le magnétisme est une propriété caractéristique des métaux ferreux, qui les rend sensibles aux aimants.



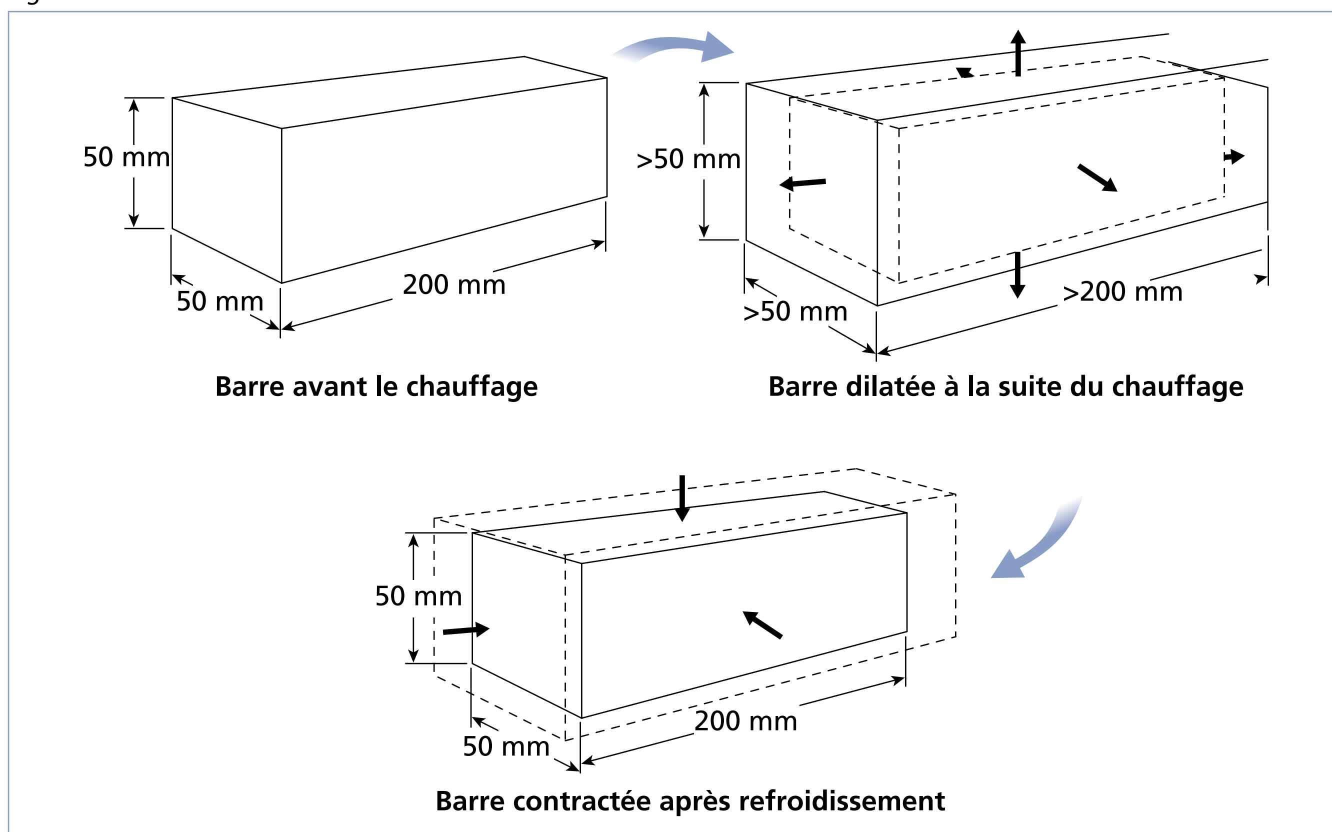
Caractéristiques thermiques et électriques

En soudage, le comportement d'un matériau sous l'effet de la chaleur permet de déterminer sa soudabilité, car la plupart des procédés de soudage impliquent l'application locale de chaleur. Voyons ici trois propriétés thermiques importantes des métaux.

Dilatation et contraction (ou retrait) thermiques

Lorsqu'un matériau est chauffé, il s'étire un peu; c'est ce qu'on appelle la dilatation. À l'opposé, il subit un raccourcissement sous l'effet du froid; c'est la contraction ou le retrait (figure 1.2). Le niveau de dilatation et de retrait d'un métal influe sur sa soudabilité. Plus le métal s'étire ou se raccourcit, plus le risque que des fissures ou des déformations apparaissent est élevé. On définit la capacité de dilatation/retrait des métaux par un coefficient thermique. Ainsi, le coefficient thermique de l'aluminium, par exemple, est plus élevé que celui de l'acier. Pour une même variation de température, l'aluminium se dilate presque deux fois plus.

Figure 1.2 Dilatation et contraction



Point de fusion

Le point de fusion indique la température à laquelle un métal passe de l'état solide à l'état liquide. Le point de fusion est un facteur important pour déterminer la soudabilité d'un métal. Ainsi, plus le point de fusion d'un métal est bas, moins la chaleur nécessaire pour le souder sera élevée.

Le tableau de la figure 1.3 présente les points de fusion de quelques matériaux

Figure 1.3 Points de fusion

Matériau	Température de fusion en °C	Température de fusion en °F
Mercure	-39	-38
Magnésium	650	1 202
Aluminium	660	1 220
Cuivre	1 085	1 985
Nickel	1 453	2 647
Fer	1 535	2 795
Titane	1 660	3 020
Alumine (oxyde d'aluminium)	2 054	3 729
Carbone (diamant)	3 550	6 422

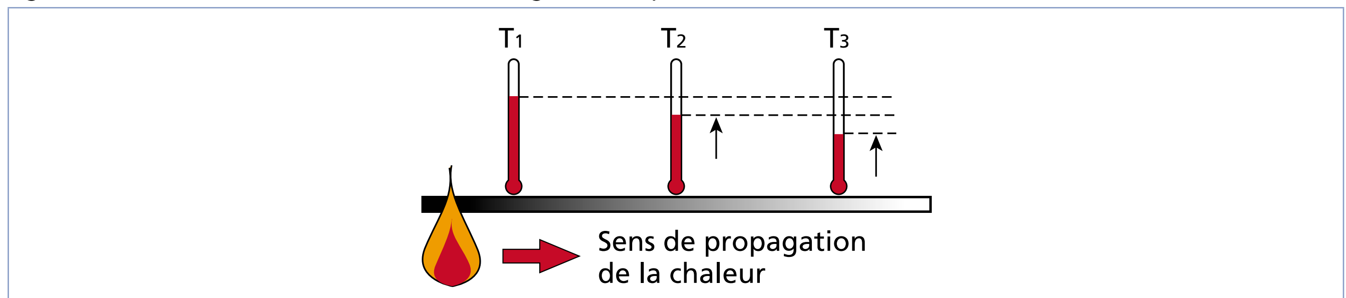


Notez que l'oxydation de l'aluminium a un effet important sur le point de fusion. C'est pour cette raison qu'on doit s'assurer d'enlever la couche d'alumine avant de souder l'aluminium.

Conductivité

La **conductivité thermique** est la capacité d'un matériau à conduire ou à transférer la chaleur (figure 1.4). La conductivité thermique est importante parce qu'elle permet de déterminer le niveau de préchauffage nécessaire et la quantité de chaleur requise pour le soudage. Le cuivre est un très bon conducteur thermique. L'aluminium possède environ la moitié de la conductivité thermique du cuivre, alors que l'acier, seulement un dixième.

Figure 1.4 Conduction de chaleur dans une tige métallique



La **conductivité électrique,** quant à elle, est définie par la capacité d'un matériau à transmettre l'électricité, d'où son importance lorsqu'on a affaire à des procédés de soudage électriques. En général, la conductivité électrique diminue avec la température.



Exercice 1.1

1. Dans la figure 1.5, associez les différentes propriétés des métaux à l'énoncé correspondant.

Figure 1.5

Quelle est la propriété qui…		Propriétés des métaux
a) permet au métal d'être allongé ou déformé sans se rompre ?	☐	1. Magnétisme
b) permet au métal de reprendre sa forme après avoir été déformé ?	☐	2. Ductilité
c) permet la transmission de la chaleur dans un métal ?	☐	3. Résistance à la corrosion
d) facilite le façonnage d'un métal en feuille mince sous un effet de compression ?	☐	4. Dureté
e) correspond à une bonne résistance à la rupture par choc ?	☐	5. Ténacité
f) attire les métaux ferreux vers les aimants ?	☐	6. Fragilité
g) indique la température à laquelle le métal se liquéfie ?	☐	7. Élasticité
h) permet à la surface d'un métal de résister aux rayures ?	☐	8. Malléabilité
i) ne supporte pas les efforts de pliage et provoque le bris du matériau lors d'un choc ou d'un impact ?	☐	9. Conductivité électrique
j) permet au métal de conduire l'électricité ?	☐	10. Conductivité thermique
k) permet au métal de résister à l'oxydation ?	☐	11. Point de fusion

Métaux ferreux

Les métaux ferreux contiennent du fer ; la plupart sont magnétiques. En soudage, l'intérêt pour les métaux ferreux est grand, car cette catégorie contient tous les aciers. En effet, l'acier est essentiellement composé de fer auquel on a ajouté un faible pourcentage de carbone. Pour former les aciers alliés, on ajoute aussi d'autres métaux qui confèrent à l'alliage des propriétés particulières.

Aciers au carbone

Les aciers au carbone (non alliés) contiennent entre 0,06 et 2,11 % de carbone (en deçà de 0,06 % de carbone, le métal est considéré comme étant du fer). Par ailleurs, sur le marché, on trouve rarement des aciers à teneur en carbone supérieure à 1,7 %.

On distingue quatre catégories d'aciers non alliés en fonction de leur teneur en carbone, comme le montre le tableau de la figure 1.6.

Figure 1.6 Teneur en carbone des aciers

Type d'acier	Teneur en carbone (%)
Acier doux	De 0,06 à 0,2
Acier semi-dur	De 0,2 à 0,5
Acier dur*	De 0,5 à 0,95
Acier extra-dur**	De 0,95 à 2,11

* Les aciers non alliés dont la teneur en carbone dépasse 0,5 % ont généralement une soudabilité très faible ou nulle; ils permettent cependant de fabriquer de très bons outils.

** L'acier extra-dur à teneur en carbone supérieure à 1,7 % ne se trouve pratiquement pas sur le marché.

La figure 1.7 illustre les utilisations possibles des divers types d'aciers en fonction de leur teneur en carbone, tandis que le tableau de la figure 1.8 présente les caractéristiques des trois principaux types d'aciers employés.

Figure 1.7 Utilisations des aciers au carbone

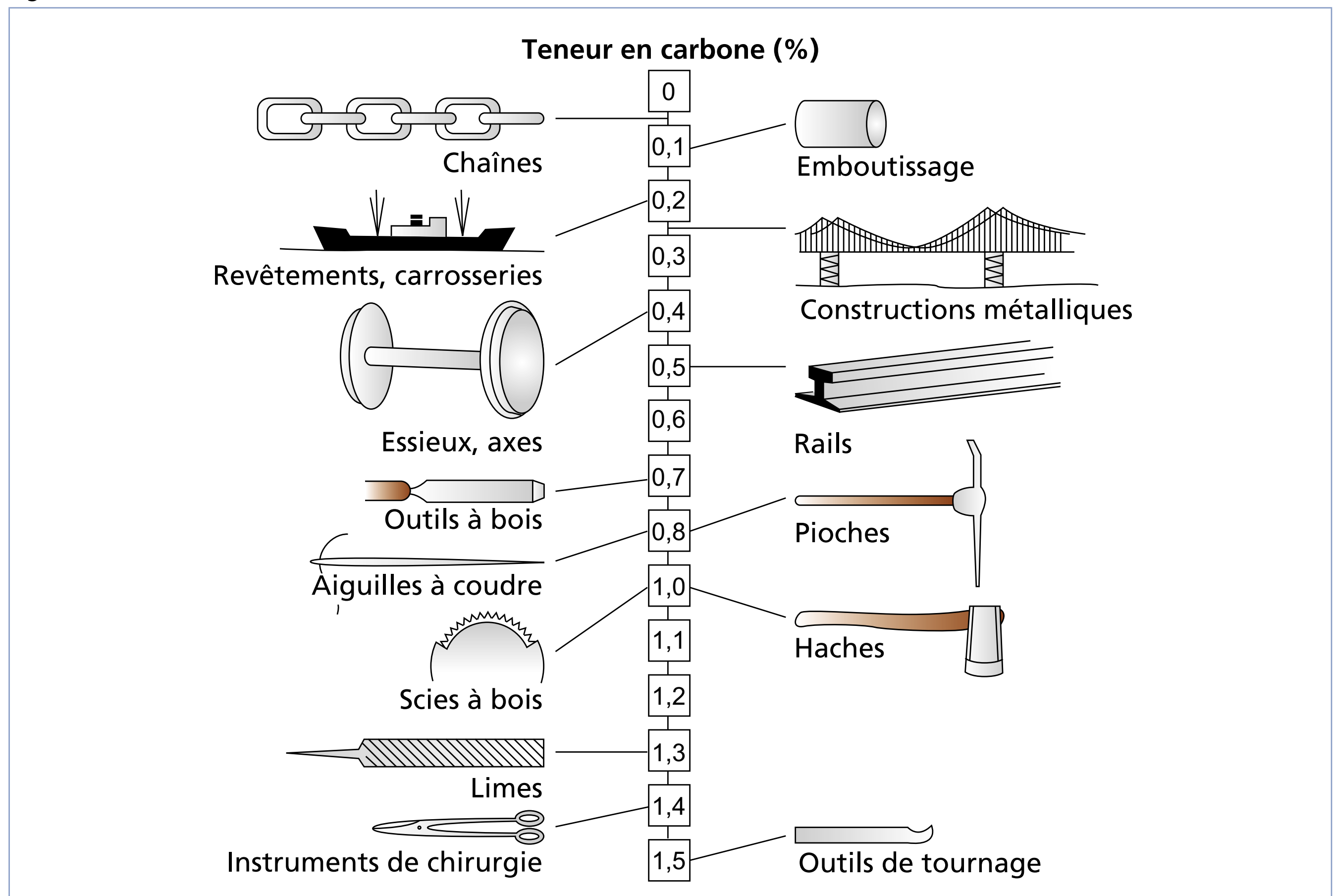


Figure 1.8 Caractéristiques et propriétés des principaux types d'aciers

Type d'acier	Caractéristiques et propriétés
Acier doux	– Est le plus largement utilisé dans l'industrie. – Sert à fabriquer des boulons, des écrous, des articles en tôle, etc. – Constitue près de 85 % de la production totale d'acier. – Est malléable, même à froid.
Acier semi-dur	– Est plus résistant à la traction que l'acier doux. – Est plus difficile à souder que l'acier doux. – Constitue un acier d'usage général pour la fabrication d'outils (ex. : marteaux, tournevis, ressorts, etc.), d'éléments préfabriqués, de pièces forgées, etc.
Acier dur	– S'usine bien mais se soude difficilement; on l'appelle aussi acier à outils, car il sert à la fabrication d'une grande gamme d'outils divers. – Sa teneur élevée en carbone lui procure une grande dureté, mais le rend fragile. – L'assemblage de l'acier dur peut se faire par boulonnage, vissage ou rivetage. – On peut le souder avec des pièces dont le point de fusion est plus bas, par exemple en fondant de l'aluminium directement sur l'acier dur.



En règle générale, plus un acier est dur, moins il est ductile.

On ajoute souvent aux aciers doux et semi-durs quelques additifs (par exemple du silicium, mais en quantité inférieure à 0,06 %, ou du manganèse, en quantité inférieure à 1,2 %) qui servent à stabiliser la structure du métal et à augmenter sa soudabilité. Par ailleurs, on y retrouve quelquefois des résidus du processus de fonte (comme le soufre ou le phosphore), mais la quantité de ces éléments ne dépasse pas 0,06 %.

Structure et traitements des aciers

Les traitements thermiques de l'acier modifient la forme des composés fer-carbone à l'intérieur de sa structure et, par le fait même, ses propriétés.

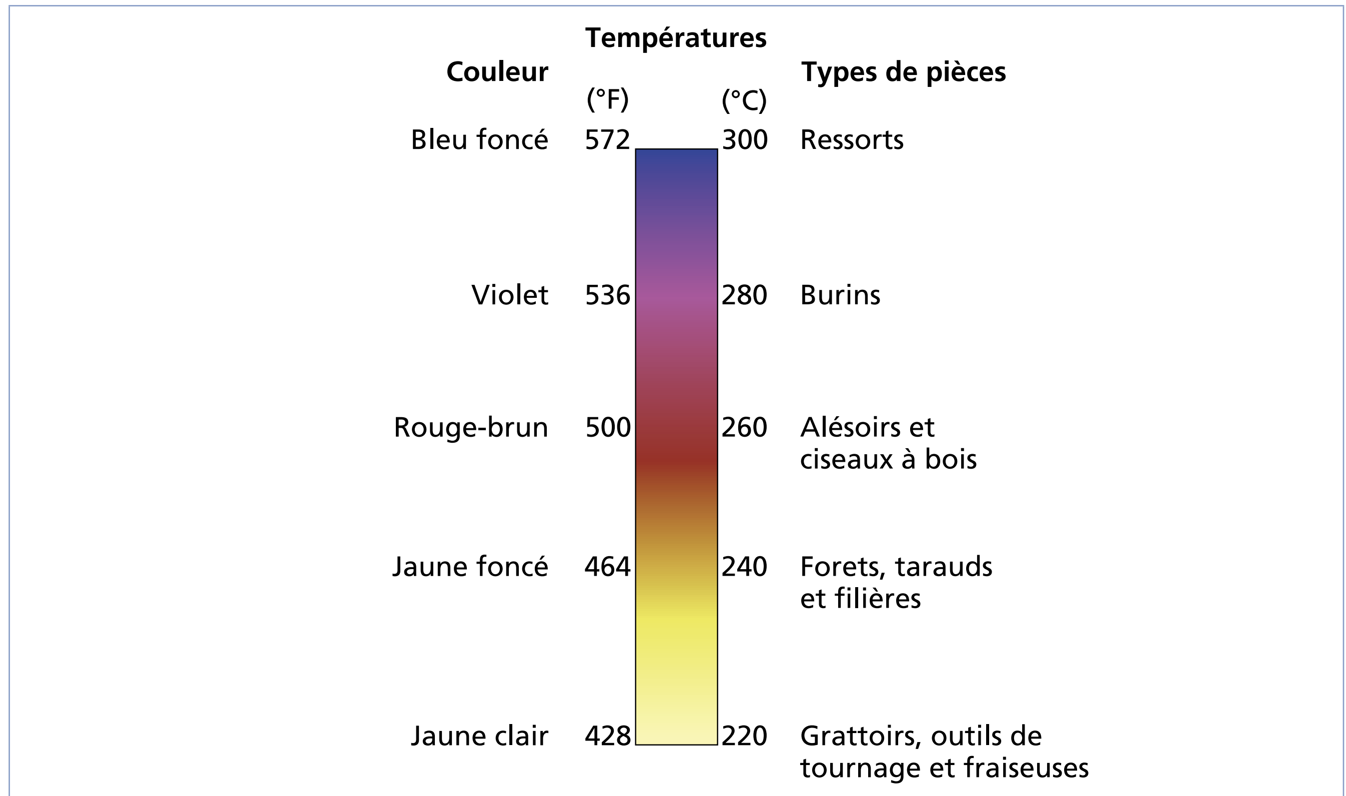
◆ *Trempe*

Les aciers peuvent être soumis à un traitement thermique, soit la trempe, qui augmente leur dureté. Lorsqu'on trempe un acier, on le chauffe à une température assez élevée pour changer sa structure interne. Une quantité supplémentaire de carbone est absorbée dans le métal, puis on le refroidit rapidement (généralement dans un bain de trempe constitué d'huile). C'est au moment du refroidissement que le durcissement se produit. Un refroidissement rapide amène l'acier à durcir.

◆ *Revenu*

Le revenu est un traitement thermique qui est souvent associé à la trempe. On l'utilise pour augmenter la résistance aux chocs de l'acier trempé, tout en conservant sa dureté. Le revenu s'effectue en chauffant la pièce à des températures plus basses. À mesure que le métal est chauffé, sa couleur varie et on peut déterminer la température de chauffe idéale simplement à partir de la couleur de l'acier (figure 1.9).

Figure 1.9 Variation de la couleur de l'acier en fonction de la température de revenu



◆ *Recuit*

Le recuit vise l'effet contraire de celui de la trempe. On chauffe l'acier à une température un peu moins élevée et on le refroidit lentement. Cela permet de retrouver la structure initiale. Le taux de refroidissement ne doit pas dépasser 50 °C/h et on doit prévoir au moins 24 heures pour refroidir la pièce.

◆ *Normalisation*

La normalisation vise à rendre la structure de l'acier plus homogène et est tout indiquée après un soudage ayant requis beaucoup de chaleur, et ce, dans le but d'éliminer les tensions internes. Pour normaliser une pièce, on la chauffe à 40 ou 50 °C au-dessus de sa température de transformation et on conserve cette température une heure pour chaque 25 mm d'épaisseur de la pièce. Ensuite, on la laisse simplement refroidir à l'air libre.

Aciers alliés

Les aciers alliés sont des aciers contenant des éléments d'alliage supplémentaires qui permettent d'obtenir des propriétés supérieures : augmenter leur dureté, leur résistance à la corrosion, leur élasticité, leur résistance à l'usure, ou encore obtenir une augmentation de leur température critique (il s'agit de la température à laquelle le métal subit une perte de ses propriétés).

On parle d'aciers fortement alliés si les éléments d'alliage comptent pour plus de 5 % de leur composition ; sinon, on les appelle aciers faiblement alliés.

Certains aciers alliés ont été élaborés spécifiquement afin d'augmenter leur soudabilité. Lors du processus de durcissement des aciers (la trempe), les aciers sont chauffés puis refroidis. Lorsque la pièce est mince, le refroidissement se produit également partout ; par contre, pour une pièce épaisse, le centre refroidit moins rapidement que la périphérie, ce qui crée des tensions internes. Des aciers alliés ont donc été développés pour remédier à ce problème.

La figure 1.10 présente les éléments d'alliage les plus fréquemment utilisés, leurs effets sur les aciers, de même que leur utilisation.

Figure 1.10 Éléments utilisés dans la fabrication des aciers alliés

Élément	Symbole chimique	Effets	Utilisation
Aluminium	Al	Sert de décapant pour éliminer les impuretés et améliorer la grosseur du grain ; limite le grossissement du grain.	Fabrication des aciers
Carbone	C	Augmente la dureté et la ténacité. Améliore l'aptitude à la trempe et la résistance à l'usure.	Aciers moulés à basse, moyenne ou haute teneur en carbone, aciers de construction
Chrome	Cr	Augmente la dureté et améliore la résistance à l'usure, sans fragilité. Augmente la ténacité et la résistance à la corrosion. Diminue la ductilité de l'acier.	Aciers inoxydables, outils, turbines, aciers de construction, pièces de machines, récipients sous pression
Cobalt	Co	Maintient la dureté du métal porté au rouge.	Fabrication de fourneaux et d'outils de coupe
Cuivre	Cu	Augmente la résistance à la corrosion atmosphérique ; abaisse la température critique. Réduit l'usinabilité par forgeage, mais n'influe pas sur le soudage réalisé à l'arc électrique ou par procédé oxyacétylénique lorsqu'il est présent dans une proportion supérieure à 0,15 %.	Profilés
Étain	Sn	Est utilisé comme revêtement et pour empêcher la corrosion.	Industrie de mise en conserve



Figure 1.10 Éléments utilisés dans la fabrication des aciers alliés (suite)

Élément	Symbole chimique	Effets	Utilisation
Manganèse	Mn	Affine la structure; augmente la ténacité et la ductilité. Améliore la qualité et le fini de surface, l'aptitude à la trempe, la résistance aux chocs et la résistance à l'usure.	Rails, essieux, barillets d'armes à feu
Molybdène	Mo	Durcit et augmente la ténacité des aciers.	Récipients sous pression, moulage pour applications sous pression, pièces de machines, outils
Nickel	Ni	Résiste aux effets de la chaleur et de la corrosion; améliore la résistance à la traction et la ductilité de l'acier.	Turbines, forgeage industriel pour charpentes à haute résistance, aciers inoxydables, récipients sous pression
Phosphore	P	Augmente la limite apparente d'élasticité et la trempabilité. Améliore les qualités d'usinage. Plus la proportion de phosphore augmente, moins l'alliage est résistant aux chocs.	Aciers faiblement alliés
Plomb	Pb	Améliore l'usinabilité lorsque ajouté à l'étain; est utilisé pour empêcher la corrosion.	Dans un milieu corrosif
Silicium	Si	Est utilisé pour améliorer la résistance à la traction. Agit comme désoxydant en général. Accroît la résistance à la dureté, mais moins que le manganèse.	Moulage de précision, aciers à aimants et pour équipement électrique
Soufre	S	Améliore l'usinabilité. Plus l'alliage contient de soufre, moins il est facile à souder.	Pièces usinées
Titane	Ti	Constitue un agent nettoyant. Prévient la précipitation du carbone dans les aciers inoxydables.	Aciers inoxydables, aciers faiblement alliés
Tungstène	W	Augmente la ténacité, la dureté ainsi que la résistance à l'usure à des températures élevées.	Aciers pour outils à coupe rapide, aimants
Vanadium	V	Procure de la ténacité et de la résistance à la traction. Résiste à l'adoucissement lors de la trempe. Retarde le grossissement du grain à la température critique.	Fabrication d'aciers, d'outils, de pièces de machines

Figure 1.10 Éléments utilisés dans la fabrication des aciers alliés (suite)



Élément	Symbole chimique	Effets	Utilisation
Zinc	Zn	Résiste à la corrosion.	Revêtement de l'acier (galvanisation)
Zirconium	Zr	Est utilisé comme désoxydant, élimine l'oxygène, l'azote et les inclusions d'éléments non métalliques lorsque l'acier est en fusion; structure à grain fin.	Tubes de charpente

Aciers inoxydables

On trouve différents types d'aciers inoxydables qui possèdent tous la caractéristique d'être très résistants à la corrosion. Ce sont des aciers fortement alliés dont les éléments d'alliage constituent plus de 35 % du contenu. On distingue généralement trois catégories d'aciers inoxydables : les aciers austénitiques, ferritiques et martensitiques (figure 1.11).

Figure 1.11 Composition et propriétés des aciers inoxydables

Type d'acier inoxydable	Composition des alliages	Propriétés
Austénitique	Chrome : 14 à 30 % Nickel : 6 à 36 %	– Ductile – Tenace – Très résistant à la corrosion – Non magnétique
Ferritique	Chrome : 11 à 27 % Carbone : 0,12 à 0,35 %	– Magnétique – Résistant – Ductile – Résistant à la corrosion et à l'oxydation (surtout lorsque le taux de carbone est un peu plus élevé)
Martensitique	Chrome : 4 à 18 % Carbone : pas plus de 0,15 % Autres éléments d'alliage : jusqu'à 3 %	– Très rigide et résistant – Magnétique – Fragile

Fontes

Les fontes (figure 1.12) sont des alliages de fer et de carbone, dont la quantité de carbone excède 2,11 %. Elles sont dures, mais fragiles, et sont plus faciles à mouler (par coulage) que l'acier, mais plus difficiles à souder. Le tableau de la figure 1.12 définit les différents types de fontes et leurs propriétés.

Figure 1.12 Propriétés et utilisations des différents types de fontes

Type de fonte	Propriétés	Utilisations
Fonte grise	– Économique, la plus répandue – Facilement usinable – Facile à couler – Bonne absorption des vibrations – Grande résistance à l'usure – Bonne conductivité thermique	– Pièces coulées d'usage général – Bâtis pour machines-outils
Fonte blanche	– Très dure et fragile – Usinable – Résistante	– Pièces d'usure (ex. : pointe, dents de godets) – Broyeurs – Fonderie d'art
Fonte malléable	– Usinable – Moins fragile que la fonte blanche	– Engrenages – Joints de tuyauterie – Bâtis
Fonte nodulaire (ou ductile)	– Métal intermédiaire entre la fonte grise et l'acier – Bonne résistance aux chocs – Contient du magnésium.	– Vilebrequins – Pistons – Bâtis
Fonte alliée	– Contient des éléments d'alliage comme le nickel, le chrome, le molybdène, le cuivre ou le manganèse (généralement plus de 3 %). – Bonne résistance mécanique – Bonne résistance à l'usure – Bonne résistance à la corrosion – Bonne résistance à la chaleur – Bonne capacité d'amortissement des vibrations	– Industrie automobile (ex. : cylindres, pistons, carters, tambours) – Pièces exposées à l'action d'agents abrasifs



Exercice 1.2

1. Associez les caractéristiques de la colonne de gauche au métal correspondant de la colonne de droite. La même réponse peut convenir à plusieurs énoncés.

Figure 1.13

Caractéristiques		Métaux
a) Métal gris foncé, très ductile et malléable	☐	1. Acier dur
b) Métal malléable résistant à la corrosion	☐	2. Acier doux
c) Métal très commun, dont la teneur en carbone varie entre 0,06 et 0,2 %	☐	3. Acier allié
d) Métal grandement utilisé dans la fabrication d'outils	☐	4. Acier inoxydable
e) Métal malléable additionné d'éléments d'alliage lui conférant des propriétés particulières, sans en diminuer la soudabilité	☐	
f) Métal dont la teneur en carbone varie entre 0,5 et 1,7 %	☐	
g) Type particulier d'alliage contenant jusqu'à 30 % de chrome ou de nickel (ou les deux)	☐	

2. Parmi les caractéristiques et les propriétés suivantes, lesquelles ne conviennent pas à l'acier doux ?

1. Grande dureté	4. Très utilisé
2. Bonne soudabilité	5. Teneur en carbone élevée
3. Malléabilité	6. Coûteux

a) 1 et 3 ☐
b) 1, 2 et 5 ☐
c) 4 et 6 ☐
d) 1, 5 et 6 ☐
e) 1 à 6 ☐

3. Qu'arrive-t-il à un acier refroidi rapidement après un chauffage intense ?

a) Il durcit. ☐
b) Il ramollit. ☐
c) Cela n'a aucun effet. ☐

4. Associez chaque effet de la colonne de gauche au procédé correspondant de la colonne de droite. Un même procédé peut entraîner plusieurs effets.

Figure 1.14

Effets produits		Procédés
a) Réduit les tensions internes causées par la trempe.	☐	1. Trempe
b) Rend l'acier plus mou et plus facile à usiner.	☐	2. Revenu
c) Rend la structure de l'acier plus homogène.	☐	3. Recuit
d) Diminue la fragilité d'une pièce tout en conservant sa dureté.	☐	4. Normalisation
e) Accroît la dureté et la résistance d'une pièce grâce à un refroidissement rapide.	☐	
f) Permet le détrempage d'une pièce.	☐	

Métaux non ferreux

Les métaux non ferreux sont multiples, mais certains sont nettement plus utilisés que d'autres. En règle générale, les métaux non ferreux ne sont pas magnétiques (c'est-à-dire qu'ils ne sont pas attirés par un aimant) et ils résistent à la corrosion.

Aluminium

L'aluminium pur est très malléable et relativement mou (ex. : le papier d'aluminium). Il est généralement utilisé sous forme d'alliage avec d'autres métaux pour fabriquer divers objets (figure 1.15).

Figure 1.15 Exemples d'objets en alliages d'aluminium



Un alliage d'aluminium-magnésium est encore plus léger que l'aluminium pur. Il peut être forgé ou coulé, mais est plus rarement soumis à un traitement thermique. Lorsque l'aluminium est allié à du cuivre, du magnésium, du manganèse, du silicium et du fer, il forme le duralumin, lequel est répandu notamment dans l'industrie des transports. Cet alliage résiste bien à la corrosion et durcit à la température ambiante, tout en demeurant d'une grande légèreté. Quant aux alliages d'aluminium-zinc, ils sont très robustes et durcissent aussi par vieillissement. Enfin, les alliages d'aluminium-silicium sont faciles à couper et malléables. On peut y ajouter du magnésium pour augmenter leur résistance à la corrosion.

Magnésium

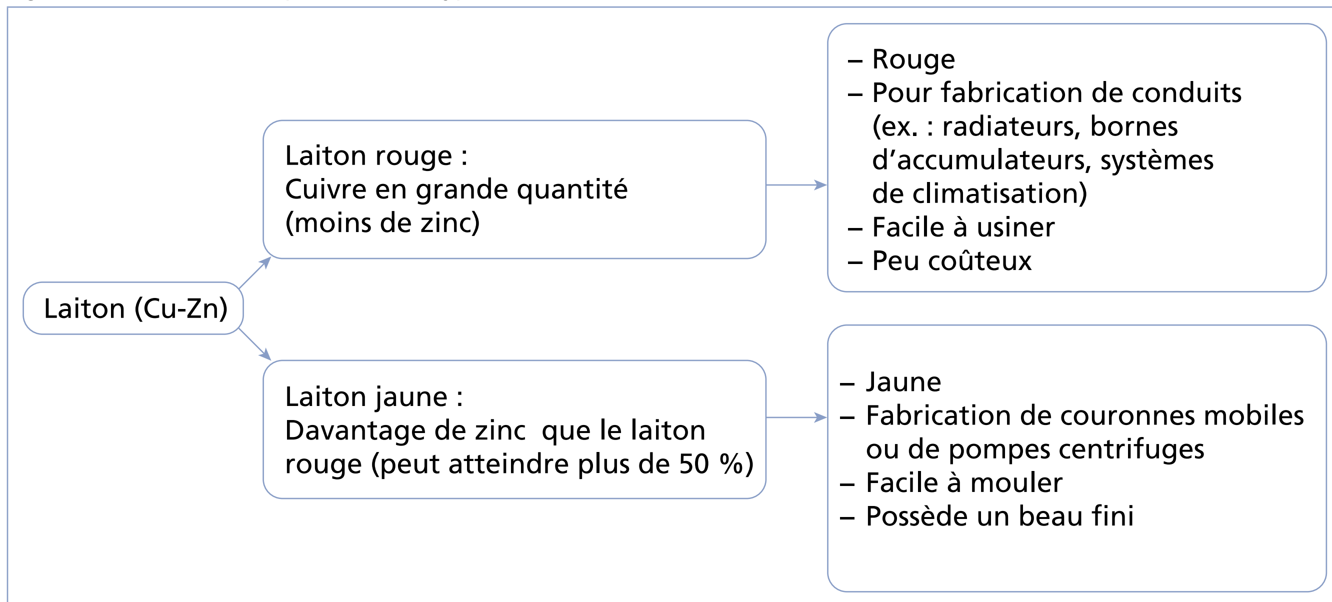
Le magnésium est un métal blanc argenté qui s'enflamme facilement. Les alliages de magnésium sont surtout utilisés dans l'industrie des transports (pièces d'avions ou d'automobiles). Ils sont particulièrement recherchés à cause de leur grande légèreté. Le magnésium peut servir de métal d'alliage à l'acier ou à l'aluminium.

Cuivre

Le cuivre est un métal rougeâtre très ductile et malléable, en plus d'être un excellent conducteur d'électricité. Il possède aussi une bonne résistance aux intempéries et de bonnes caractéristiques mécaniques. Il ternit et se couvre de vert-de-gris. On l'utilise beaucoup dans la fabrication de fils électriques ou en tuyauterie.

Le laiton, quant à lui, est un alliage de cuivre et de zinc. Chaque type de laiton présente des caractéristiques particulières (figure 1.16).

Figure 1.16 Caractéristiques de deux types de laiton



Quant au bronze, c'était originellement un alliage de cuivre-étain. Aujourd'hui, ce terme désigne à peu près tous les alliages de cuivre qui ne sont pas du laiton. On les identifie en fonction de l'élément d'alliage principal. Les principaux métaux d'alliage du bronze sont l'étain (équipements marins, corps de pompes), l'aluminium (engrenages, outils, éléments

de fixation), le nickel (tubes, paliers, corps de valves), le silicium (réservoirs, tuyauterie, engrenages) et le béryllium (ressorts, matrices, filières).

Nickel

Le nickel est un métal blanc grisâtre que l'on trouve le plus souvent comme élément d'alliage. Il est malléable et ductile. Dans un alliage, il augmente la ductilité, la dureté et la résistance des métaux. Les alliages de nickel sont utilisés pour la production de pièces devant supporter des températures élevées (ex. : résistances électriques, évaporateurs et échangeurs, etc.). L'inconel est un alliage de nickel-chrome-fer, tandis que le monel est un alliage de nickel-cuivre ; d'autres éléments d'alliage peuvent aussi être présents dans l'un ou l'autre.

Titane

Le titane est un métal blanc brillant que l'on trouve généralement allié à de faibles quantités d'éléments comme l'oxygène, l'azote, le carbone ou l'acier (titane presque pur dont les éléments d'alliage ne dépassent pas 1,5 %).

Les alliages alpha contiennent jusqu'à 7 % d'aluminium et moins de 3 % d'oxygène, d'azote et de carbone ; les alliages alpha-bêta sont additionnés, outre l'aluminium, d'éléments supplémentaires tels le chrome, le vanadium ou le molybdène.

Enfin, le titane est utilisé dans l'industrie aérospatiale, chimique ou dans la fabrication d'équipement sportif.



Exercice 1.3

1. Associez chaque définition de la colonne de gauche au métal correspondant de la colonne de droite. Le même métal peut convenir à plusieurs énoncés.

Figure 1.17

Définitions		Métaux
a) Métal rouge-brun, ductile et malléable	☐	1. Aluminium
b) Métal blanc argent pouvant s'enflammer	☐	2. Cuivre
c) Alliage fait de cuivre et de zinc	☐	3. Magnésium
d) Métal commun à tous les bronzes	☐	4. Laiton
e) Métal léger, bon conducteur, résistant à la corrosion et plutôt économique	☐	5. Nickel
f) Métal très bon conducteur d'électricité se couvrant de vert-de-gris sous l'effet de l'humidité	☐	
g) Métal blanc-gris utilisé comme élément d'alliage pour augmenter la dureté et la résistance des métaux	☐	

2. Parmi les propriétés suivantes, lesquelles ne caractérisent pas l'aluminium ?

1. Léger	4. Conductible
2. Rouille facilement.	5. Robuste
3. Difficile à usiner	6. Malléable

a) 3 et 6 ☐
b) 2, 3, 4 et 6 ☐
c) 2 et 3 ☐
d) 1, 2 et 4 ☐
e) 1, 5 et 6 ☐
f) 1 à 6 ☐

3. Associez chaque alliage au métal qui le compose principalement. Un même métal peut convenir à plusieurs alliages.

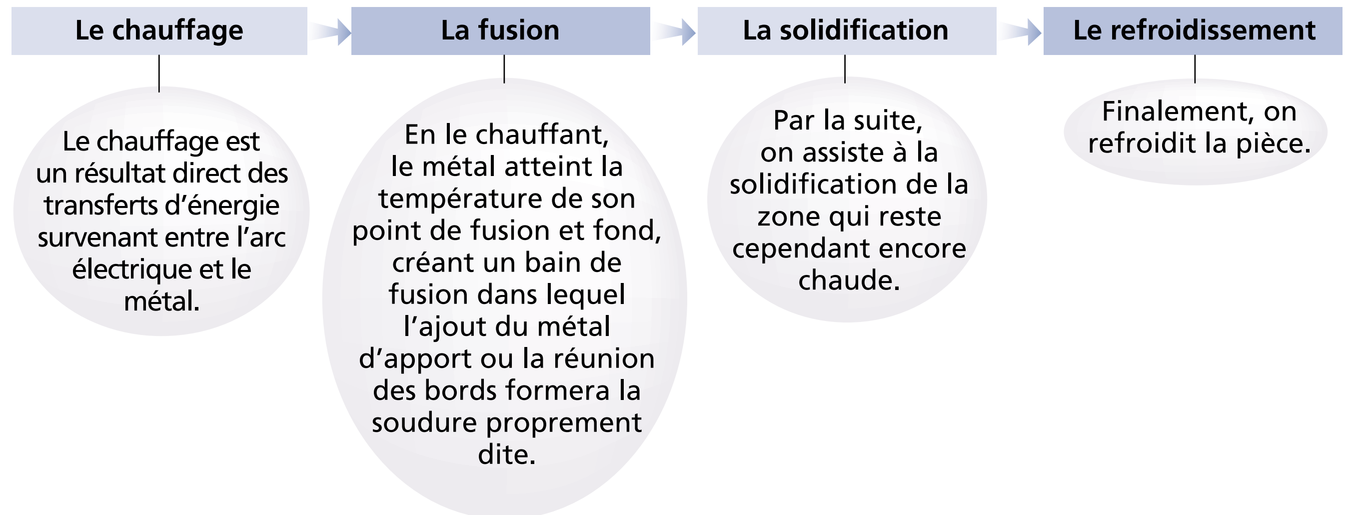
Figure 1.18

Alliages		Métaux
a) Inconel	☐	1. Aluminium
b) Duralumin	☐	2. Cuivre
c) Bronze	☐	3. Nickel
d) Monel	☐	
e) Laiton	☐	

Soudabilité des métaux

La plupart des procédés de soudage entraînent le réchauffement, puis le refroidissement du métal. Ces variations de température ont un impact sur la structure du métal dans la zone soudée. La zone périphérique au bain de fusion, également touchée par cet accroissement de la température, est appelée « zone thermiquement atteinte » ou ZTA.

On peut distinguer quatre étapes importantes lors de l'application d'un procédé de soudage à l'arc :



Facteurs de détermination des effets des opérations de soudage

On compte quatre principaux facteurs qui déterminent les effets des opérations de soudage et qui entrent en considération dans le choix d'un procédé :

- Quantité de chaleur transférée
- Température initiale de la pièce
- Vitesse de refroidissement du métal
- Température atteinte dans la ZTA

Quantité de chaleur transférée

La quantité de chaleur transférée dépend essentiellement du procédé de soudage utilisé (figure 1.19).

Figure 1.19 Coefficients de transmission thermique des procédés de soudage

Procédé de soudage	Coefficients de transmission de la chaleur dans la pièce (%)
Soudage à l'arc submergé (SAW)	90 à 99
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein (GMAW)	65 à 85
Soudage à l'arc avec fil fourré de flux (FCAW)	65 à 85
Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	50 à 85
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire de tungstène (GTAW)	20 à 50

Données provenant du Bureau canadien du soudage

Température initiale de la pièce

La température initiale détermine la vitesse de refroidissement de la pièce et l'humidité qu'elle contient. Un préchauffage approprié permet de diminuer la vitesse de refroidissement et d'assécher les pièces, ce qui atténue les risques d'absorption d'hydrogène.

Vitesse de refroidissement du métal

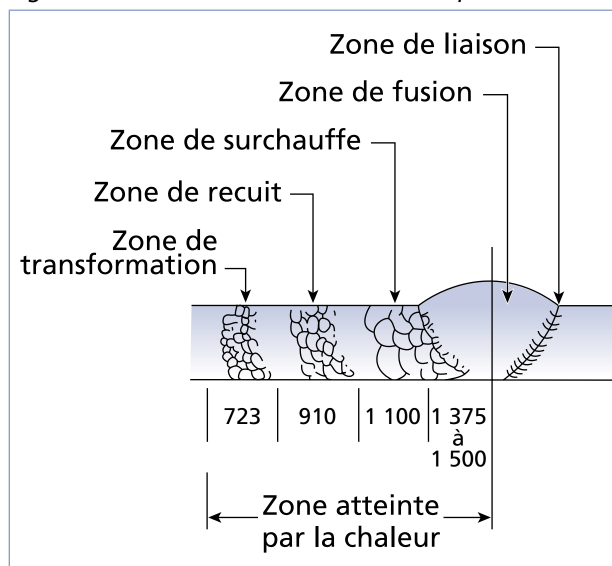
La vitesse de refroidissement dépend de la différence de température entre la pièce et le milieu de refroidissement ; plus l'écart est élevé, plus le refroidissement sera rapide. Plus les zones de contact entre le cordon de soudure et le milieu de refroidissement sont étendues, plus le refroidissement sera rapide.

Température atteinte dans la ZTA

La température atteinte dans la ZTA modifie la structure finale du métal dans cette zone. La figure 1.20 illustre l'influence de la température atteinte dans la ZTA dans le cas de l'acier. On remarque que la grosseur des grains est proportionnelle à la chaleur atteinte dans la ZTA.

La conductivité thermique du métal détermine la vitesse à laquelle le métal transfère la chaleur depuis la ZTA, donc la taille des zones atteintes par la chaleur. L'épaisseur des pièces et l'énergie linéaire sont deux facteurs qui influent sur la vitesse de refroidissement et la taille de la ZTA.

Figure 1.20 Différentes zones atteintes par la chaleur



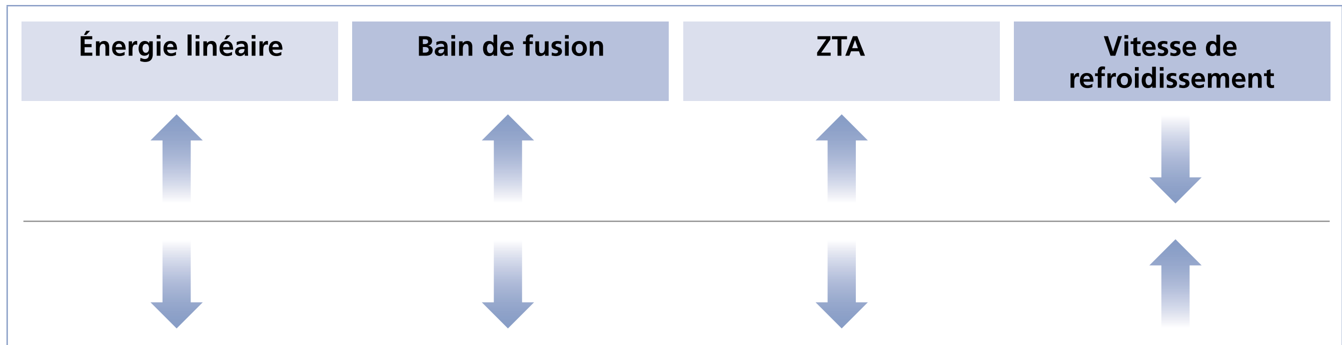
Énergie linéaire

L'énergie linéaire (E_l) correspond à l'énergie transférée au métal de base par unité de longueur de soudure. Elle dépend de la vitesse d'avance (v), de même que de la tension (V) et de l'intensité de courant (I) utilisées : $E_l = \frac{L \times V}{v}$

L'énergie linéaire s'exprime en joules/millimètre (J/mm) lorsque le courant est exprimé en ampères (A), la tension en volts (V) et la vitesse en millimètres/seconde (mm/s).

Plus l'énergie linéaire est élevée, plus la ZTA sera grande et plus la vitesse de refroidissement sera lente (figure 1.21). Par contre, l'épaisseur des pièces provoque l'effet inverse : plus elle est grande, plus la pièce refroidira rapidement et plus la ZTA sera petite.

Figure 1.21 Effets de l'énergie linéaire



Coefficient de dilatation

Les taux de dilatation et de contraction (retrait) de chaque métal ainsi que sa ductilité permettent de prévoir comment le métal réagira lors du soudage. Le coefficient de dilatation représente la valeur de l'augmentation de volume d'un métal sous l'effet de la chaleur en exprimant la valeur de la déformation linéaire. Le tableau de la figure 1.22 présente la valeur des coefficients de différents métaux pour chaque degré Celsius d'augmentation de la chaleur. L'unité de mesure de la dilatation est le micron (μ), lequel est égal à un millionnième de mètre ou encore, un millième de millimètre (1 μ = 0,001 mm). Les valeurs de dilatation sont valides pour chaque mètre linéaire de métal.

Figure 1.22 Coefficients de dilatation linéaire

Métal	Coefficients de dilatation en microns (μ)
Acier	12
Aluminium	23
Argent	19
Bronze	18
Cuivre	17
Étain	23
Fer	12
Fonte	11
Laiton	19
Magnésium	23
Or	15
Plomb	29
Tungstène	4
Zinc	30

Lorsqu'on connaît la température initiale et la température finale d'un métal, on peut ainsi calculer l'ampleur de sa dilatation (ou de sa contraction, s'il refroidit).

Par exemple, comparons la dilatation d'une barre d'acier à celle d'une barre d'aluminium, d'un mètre chacune, lorsqu'on les chauffe à 400 °C à partir d'une température initiale de 20 °C, soit une augmentation de température de 380 °C (figure 1.23).

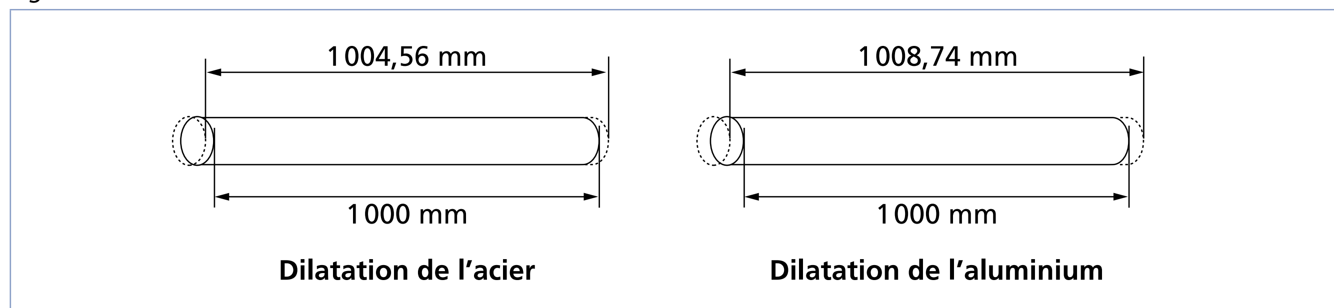
Pour chaque degré, la barre d'acier se dilate de 12 μ/m (soit 0,012 mm/m) ; par mètre, la variation totale sera donc de :

380 °C × 0,012 mm/°C = 4,56 mm

Par contre, la barre d'aluminium se dilate de 23 μ/m (ou 0,023 mm/m) ; la variation par mètre sera plutôt de :

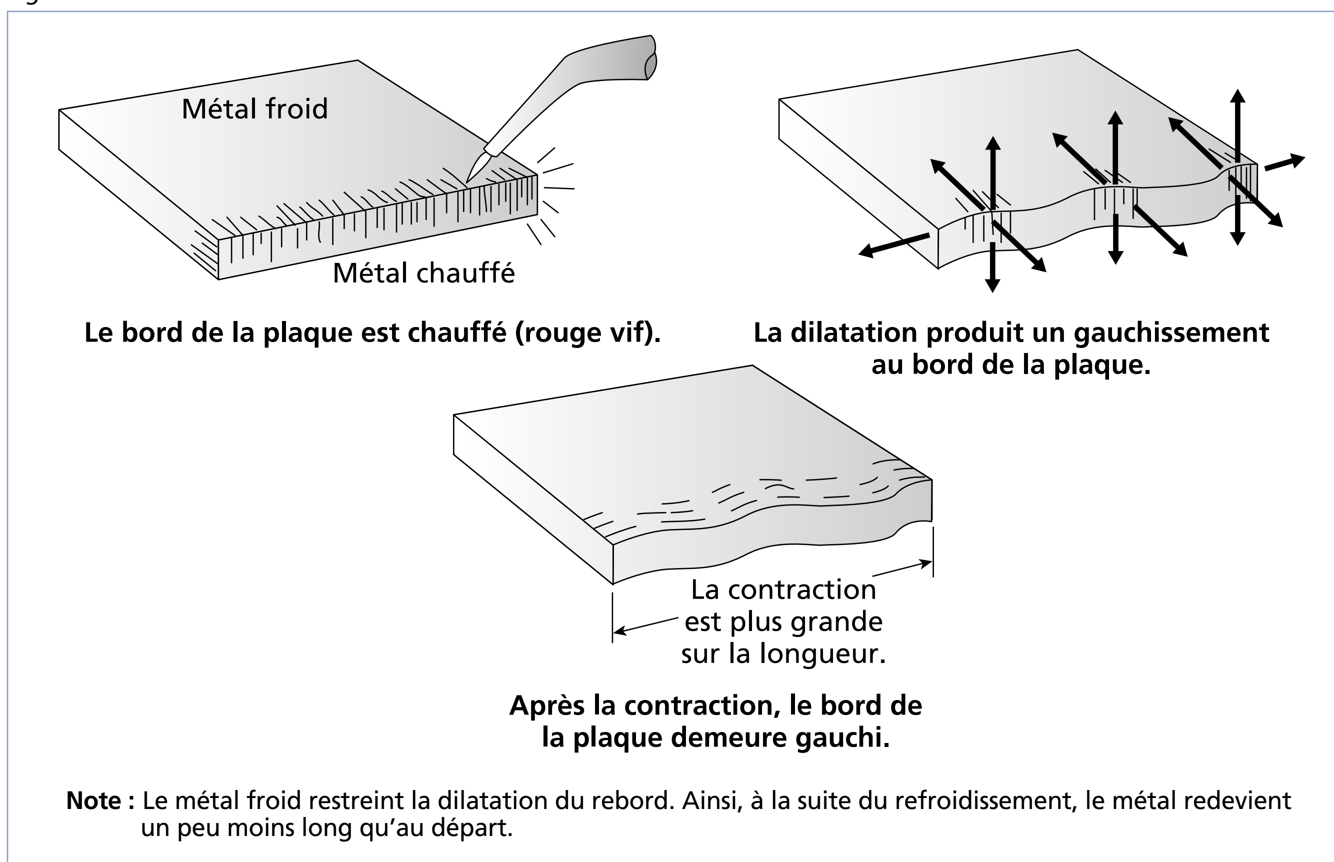
380 °C × 0,023 mm/°C = 8,74 mm, ce qui correspond à près de deux fois la valeur de dilatation de l'acier.

Figure 1.23 Dilatation de l'acier et de l'aluminium



En soudage, on ajoute généralement un métal d'apport à la pièce soudée, ce qui provoque un retrait (contraction) généralement plus grand que la dilatation qui a eu lieu avant l'ajout du métal d'apport. Par ailleurs, comme la pièce doit être maintenue en place, elle subit des contraintes dans l'espace et ne se dilate généralement pas dans tous les sens de manière égale (figure 1.24). Tous ces facteurs peuvent être à l'origine de déformations dans la pièce soudée. Ces déformations et les moyens de les prévenir seront traités plus en détail au chapitre 6.

Figure 1.24 Refoulement

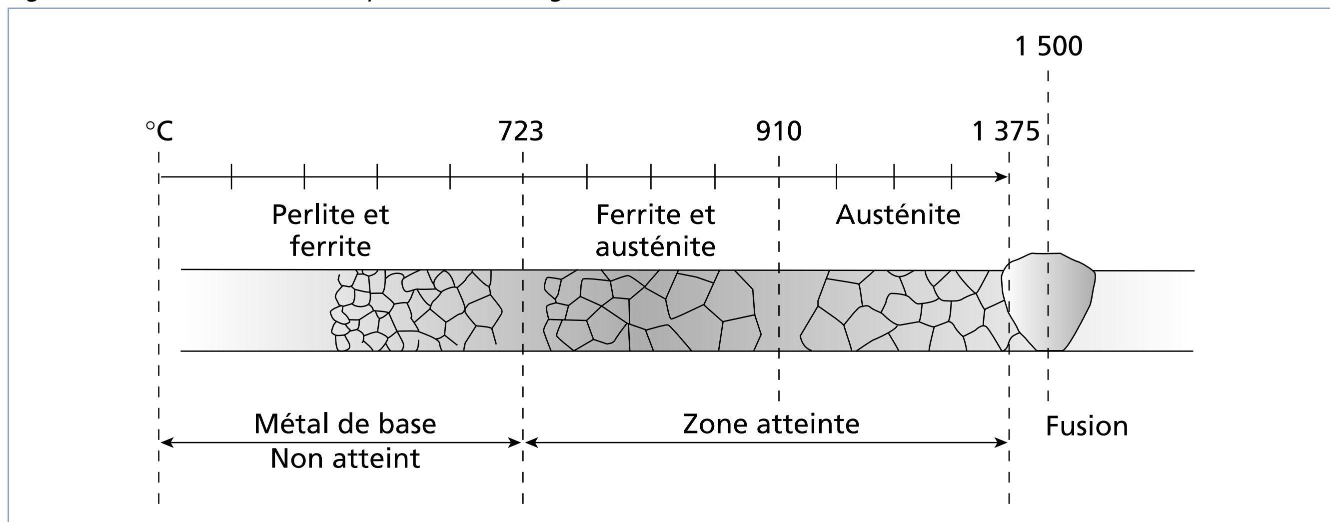


Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés

La soudabilité des aciers dépend de la structure interne du métal dans la ZTA après le soudage. Afin de préserver les qualités du métal à souder, notamment en ce qui concerne la ductilité, le métal soudé doit retrouver une structure interne similaire à son état initial.

La figure 1.25 illustre l'effet de la température sur les grains de l'acier. Remarquez la zone où on trouve de l'austénite ; c'est dans cette zone que, dans le cas où le refroidissement est trop rapide, le métal se solidifie en martensite plutôt qu'en ferrite et en perlite, ce qui crée des tensions internes.

Figure 1.25 Influence de la température sur les grains



Les principaux facteurs qui influent sur la soudabilité du carbone sont les suivants :

- Trempabilité : c'est le facteur principal. Il détermine le comportement des aciers lors du refroidissement rapide. Plus l'acier a tendance à adopter une structure martensitique, plus sa fragilité augmente et cela accroît d'autant les risques de fissures.
- Carbone équivalent : le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trempabilité de l'acier, car plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier est susceptible de subir la trempe. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent (figure 1.26).

Figure 1.26 Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	Préchauffage
< 0,40	Excellent	Aucun
0,40 à 0,50	Bon	Aucun De 100 à 300 °C
0,50 à 0,60	Moyen	De 100 à 300 °C De 200 à 400 °C
0,60 à 0,70	Médiocre	De 300 à 400 °C
> 0,70	Mauvais	Non soudable

Les métaux suivants entrent dans le calcul du carbone équivalent : le carbone bien sûr (C), le manganèse (Mn), le silicium (Si), le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le vanadium (V), le nickel (Ni) et le cuivre (Cu). La formule à utiliser est la suivante :

$$\text{Carbone équivalent} = C + \frac{Mn + Si + Cr}{6} + \frac{Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Dans cette formule, le symbole de l'élément indique son pourcentage de masse dans l'alliage (par exemple, si on a 0,5 % de carbone et 0,03 % de manganèse, alors C = 0,5 et Mn = 0,03).



Plus la teneur en carbone est élevée, plus les aciers sont difficiles à souder.

Soudabilité des aciers inoxydables

Les propriétés physiques qui influent sur la soudabilité de ces aciers, comparativement aux aciers au carbone, sont les suivantes :

– Un point de fusion inférieur : la température nécessaire pour obtenir la fusion du métal est moins élevée ; par conséquent, l'énergie nécessaire pour le soudage sera moindre.
– Une conductibilité thermique plus faible : ce facteur accroît encore l'importance de prévoir une moins grande énergie pour le soudage, car une conductibilité thermique élevée indique que la chaleur sera plus dispersée dans le métal et qu'il y aura des pertes.
– Une résistance électrique plus élevée : plus la résistance électrique est élevée, plus le bain de fusion est facile à créer ; par contre, l'amorçage de l'arc est plus difficile.
– En fait, pour toutes ces raisons, la taille de la ZTA d'un acier inoxydable sera d'environ 50 % plus grande que celle d'un acier au carbone, dans les mêmes conditions.

Il existe plusieurs types d'aciers inoxydables possédant des niveaux de soudabilité différents (figure 1.27).

Figure 1.27 Facteurs influant sur la soudabilité de différents types d'aciers inoxydables

Type d'acier inoxydable	Facteurs influant sur la soudabilité
Austénitique	– Coefficient de dilatation supérieur (environ 1,5 fois celui de l'acier au carbone), donc sensible aux déformations – Conductibilité thermique plus faible que celle de l'acier doux, donc une ZTA moins grande pour un même courant – Résistance électrique jusqu'à 6 fois plus élevée que celle de l'acier doux – Point de fusion inférieur à celui de l'acier doux, donc température nécessaire moindre
Martensitique	– Coefficient de dilatation inférieur (minimise les déformations lors du soudage) – Conductibilité thermique plus faible que celle de l'acier doux (intensité de courant plus basse) – Résistance électrique de 3 à 6 fois plus élevée que celle des aciers au carbone – Forte tendance à durcir au contact de l'air
Ferritique	– Aucun durcissement, même lorsque refroidi rapidement – Le grain grossit si la pièce est chauffée à plus de 870 °C, puis refroidie lentement, ce qui rend la pièce fragile.

Soudabilité des fontes

Les fontes blanches ne se soudent pratiquement pas. Les autres fontes (grises, malléables et nodulaires) peuvent être soudées sous certaines conditions. Ce sont les fontes nodulaires, plus ductiles, qui sont les plus faciles à souder. On ne soude généralement pas de fontes dans l'industrie de la fabrication, sauf dans le cas de certaines opérations de réparation.

Soudabilité des métaux non ferreux

Le tableau de la figure 1.28 rappelle les principaux facteurs influant sur la soudabilité des métaux non ferreux.

Figure 1.28 Facteurs influant sur la soudabilité de certains métaux non ferreux

Métal	Facteurs influant sur la soudabilité
Aluminium	– Un coefficient de dilatation élevé, ce qui accroît les risques de déformation du métal lors du refroidissement. – Un point de fusion bas : le bain de fusion est rapidement créé et il est très fluide. – Conductibilité thermique élevée : il y a beaucoup de pertes de chaleur dans le métal, donc la température de soudage doit être plus élevée. – Il y a formation d'oxyde à la surface très dure dont le point de fusion est supérieur à celui de l'aluminium.
Nickel	– Il se soude bien même sans préchauffage. – Le métal doit être bien nettoyé pour éliminer la présence d'oxyde sur sa surface. – La pénétration dans le nickel est généralement inférieure à celle de l'acier.
Cuivre	– Une conductivité thermique élevée, jusqu'à 50 % plus grande que celle de l'acier (à l'exception de certains alliages de cuivre-nickel). – Un coefficient de dilatation élevé. – Un point de fusion relativement bas et un bain de fusion très fluide. – La composition de chaque alliage peut modifier ses caractéristiques. – La soudabilité du laiton dépend en grande partie de sa teneur en zinc puisque celui-ci se volatilise lors du soudage. Cela peut causer des défauts; les laitons à faible teneur en zinc ont une plus grande soudabilité.
Titane	– Presque pur, il possède une excellente soudabilité. – Les alliages alpha se soudent facilement. Ils peuvent être recuits, mais ne peuvent pas être durcis par traitement thermique. – La soudabilité des alliages alpha-bêta varie en fonction des éléments d'alliage qu'ils contiennent ; une grande quantité de chrome, par exemple, diminue beaucoup la soudabilité du métal.



Exercice 1.4

1. Placez dans l'ordre les quatre principales étapes du soudage.

   a) La fusion
   b) La solidification
   c) Le refroidissement
   d) Le chauffage

   Ordre : ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

2. Parmi les éléments suivants, lequel ne constitue pas l'un des quatre principaux facteurs influant sur les opérations de soudage ?

   a) La quantité de chaleur transférée ☐
   b) La température initiale de la pièce ☐
   c) La vitesse de refroidissement ☐
   d) La température de l'air ☐
   e) La température atteinte dans la ZTA ☐

3. Vrai ou faux ?

	Vrai	Faux
a) Plus l'énergie linéaire est élevée, plus le bain de fusion est important.	☐	☐
b) L'étendue de la ZTA augmente lorsque l'énergie linéaire augmente.	☐	☐
c) La vitesse de refroidissement est plus lente lorsque l'énergie linéaire est basse.	☐	☐
d) Plus la vitesse de refroidissement est rapide, plus la dureté des métaux diminue.	☐	☐
e) Le coefficient de dilatation du laiton est plus élevé que celui du cuivre ; par conséquent, lorsqu'il est chauffé, le laiton a moins tendance à changer de dimension que le cuivre.	☐	☐

4. Quel(s) facteur(s) influe(nt) principalement sur la soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés ?

1. Le carbone équivalent	4. La propreté de la surface
2. L'épaisseur	5. La trempabilité
3. La couleur	6. La coupe

   a) 1 et 3 ☐
   b) 2, 3 et 5 ☐
   c) 1, 4 et 6 ☐
   d) 2, 5 et 6 ☐

e) 1 et 5 ☐
f) 3 et 4 ☐
g) 5 ☐
h) 1 à 6 ☐

5. Quelles propriétés physiques influent sur la soudabilité des aciers inoxydables comparativement aux aciers au carbone ?

1. Leur point de fusion	4. Leur malléabilité
2. Leur conductibilité thermique	5. Leur résistance électrique
3. Leur résistance à la corrosion	

a) 1, 2 et 5 ☐
b) 1, 2 et 3 ☐
c) 1 et 4 ☐
d) 2, 3 et 5 ☐
e) 2 et 5 ☐
f) 1 et 5 ☐

6. Vrai ou faux ?

	Vrai	**Faux**
a) Le point de fusion des aciers inoxydables est plus bas que celui des aciers au carbone.	☐	☐
b) La résistance à la corrosion des aciers inoxydables est identique à celle des aciers au carbone.	☐	☐
c) La conductibilité électrique des aciers inoxydables est meilleure que celle des aciers au carbone.	☐	☐
d) La conductibilité thermique des aciers inoxydables est plus faible que celle des aciers au carbone.	☐	☐

7. Quel type de fonte se soude le plus facilement ?

a) La fonte grise ☐
b) La fonte blanche ☐
c) La fonte nodulaire ☐

8. Laquelle de ces caractéristiques ne constitue pas un facteur influant sur la soudabilité de l’aluminium ?

a) Son coefficient de dilatation ☐
b) Sa malléabilité ☐
c) Sa conductibilité thermique ☐
d) La présence d’oxyde à la surface du métal ☐

9. Laquelle de ces caractéristiques ne constitue pas un facteur influant sur la soudabilité du cuivre ?

   a) Sa conductivité électrique ☐
   b) Son coefficient de dilatation ☐
   c) Son point de fusion ☐
   d) Sa dureté ☐

Résumé

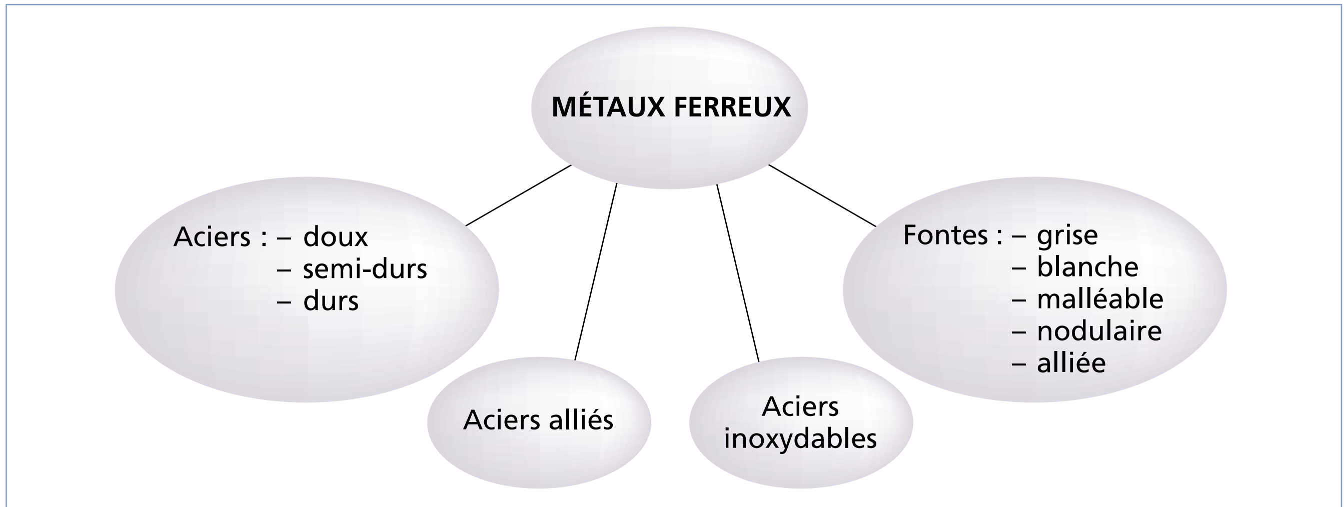
– Le tableau suivant (figure 1.29) résume les différentes propriétés des métaux.

Figure 1.29 Propriétés des métaux

Propriété	Description	Exemples de matériaux
Fragilité	Absence de flexibilité, cassant	Fonte
Ductilité	Tolérance aux déformations (s'allonge, s'étire, se tord) sans rupture	Aluminium, acier doux, cuivre
Ténacité	Résistance aux chocs	Acier
Malléabilité	Mise en forme facile, s'aplatit	Aluminium, acier doux, cuivre
Élasticité	Reprise de sa forme initiale après une déformation	Acier
Dureté	Résistance à la pénétration, aux rayures	Acier dur, fonte
Résistance à l'abrasion	Résistance à l'usure par frottement	Acier allié
Résistance à la corrosion	Résistance à la dégradation chimique causée par l'oxygène	Acier inoxydable, aluminium
Magnétisme	Sensibilité à l'attraction des aimants	Fer, acier
Dilatation/contraction (retrait) thermique	Allongement ou rétrécissement du matériau en fonction de la température	Tous les métaux
Point de fusion	Température à laquelle le métal passe à l'état liquide	Tous les métaux
Conductivité thermique	Capacité de conduire ou de transmettre la chaleur	Aluminium, cuivre
Conductivité électrique	Capacité de conduire l'électricité	Cuivre

– La figure 1.30 présente les quatre catégories de métaux ferreux.

Figure 1.30 Métaux ferreux



– L'acier, et particulièrement l'acier doux, constitue le matériau le plus souvent soudé. Les aciers durs se soudent moins bien. On peut, par contre, les assembler de façon mécanique.
– On obtient des aciers durs en leur faisant subir un traitement thermique, soit la trempe, qui provoque le durcissement du métal tout en augmentant sa fragilité. Il est aussi possible de tremper des aciers doux en surface seulement.
– On utilise surtout les aciers alliés afin d'obtenir un métal qui combine les propriétés de ductilité d'un acier à faible teneur en carbone avec la dureté d'un acier à teneur plus élevée. Par contre, les propriétés particulières des aciers alliés varient en fonction des éléments d'alliage qu'ils contiennent.
– L'acier inoxydable est utilisé principalement pour sa propriété de résistance à la corrosion.
– Les fontes sont surtout utilisées pour être coulées ; on les soude rarement.
– Les métaux non ferreux ont, en général, une bonne résistance à la corrosion. Certains, comme l'aluminium ou le magnésium, sont aussi très légers. On utilise le plus souvent les métaux non ferreux sous forme d'alliages. Plusieurs d'entre eux possèdent aussi une bonne conductivité électrique et thermique.
– Les principaux métaux non ferreux et leurs propriétés apparaissent à la figure 1.31.

Figure 1.31 Caractéristiques des métaux non ferreux

Métal	Couleur	Densité	Point de fusion (°C)	Principales propriétés
Aluminium (Al)	Blanc brillant	2,7	660	– Léger – Ductile – Malléable – Bon conducteur – Forme une couche d'oxyde d'aluminium.
Étain (Sn)	Blanc	7,3	232	– Malléable – Ductile – Très mou – Faible résistance mécanique – N'est pas touché par l'eau ou l'air.
Plomb (Pb)	Gris bleuâtre	11,3	327	– Malléable – Ductile – Mou – Résistant à la corrosion – Mauvais conducteur
Zinc (Zn)	Blanc bleuâtre	7,2	419	– Cassant (à la température ambiante) – Malléable (200 °C) – Résistant à la corrosion
Magnésium (Mg)	Blanc argenté	1,7	650	– Malléable – Ductile – Résistant à la corrosion – Inflammable – Faible résistance mécanique
Argent (Ag)	Blanc brillant	10,5	950	– Malléable – Ductile – Très bon conducteur
Cuivre (Cu)	Rouge-brun	8,9	1 083	– Malléable – Ductile – Conducteur – Forme une couche de vert-de-gris lorsqu'il est exposé à l'humidité.
Manganèse (Mn)	Grisâtre	7,4	1 245	– Cassant – Très dur – Résistant – S'oxyde facilement.
Nickel (Ni)	Blanc grisâtre	8,9	1 455	– Malléable – Ductile – Résistant à la corrosion
Titane (Ti)	Blanc brillant	5,0	1 660	– Résistant à la corrosion – Charge à la rupture élevée – Bonnes propriétés mécaniques à haute température

- Les principaux facteurs influant sur la soudabilité d'un métal sont :
  - la quantité de chaleur transférée au métal de base (selon le procédé de soudage utilisé);
  - la température atteinte dans la ZTA qui dépend, entre autres, de la conductivité thermique du métal et du procédé de soudage;
  - la température initiale de la pièce qui influe, notamment, sur sa vitesse de refroidissement;
  - la vitesse de refroidissement du métal, laquelle détermine la possibilité de modifications structurelles du métal pouvant altérer ses propriétés de base.
- L'épaisseur des pièces et l'énergie linéaire du procédé de soudage influent sur la vitesse de refroidissement et la taille de la ZTA.
- La soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés dépend fortement de leur teneur en carbone (ou carbone équivalent), de même que de leur trempabilité. Une teneur élevée en carbone équivalent de même qu'une tendance élevée à la trempe rendent le soudage difficile.
- Les aciers inoxydables requièrent une intensité de courant plus faible que les aciers au carbone pour être soudés. Leur point de fusion est plus bas, leur conductivité thermique plus faible et leur résistance électrique plus élevée que celle des aciers non alliés.
- Les fontes sont vulnérables aux déformations lorsque soudées, notamment à cause de leur fragilité.
- L'aluminium a un point de fusion assez bas et un bain de fusion très fluide. Par ailleurs, on trouve souvent des dépôts d'oxyde à sa surface. Ces éléments doivent être pris en considération lors du soudage de l'aluminium, afin d'éviter les déformations.
- Le cuivre et ses alliages présentent généralement une forte conductivité thermique et électrique. Il est important de les préchauffer.

Notes

Chapitre 2

PROCÉDÉS DE SOUDAGE (MANUELS ET SEMI-AUTOMATIQUES)

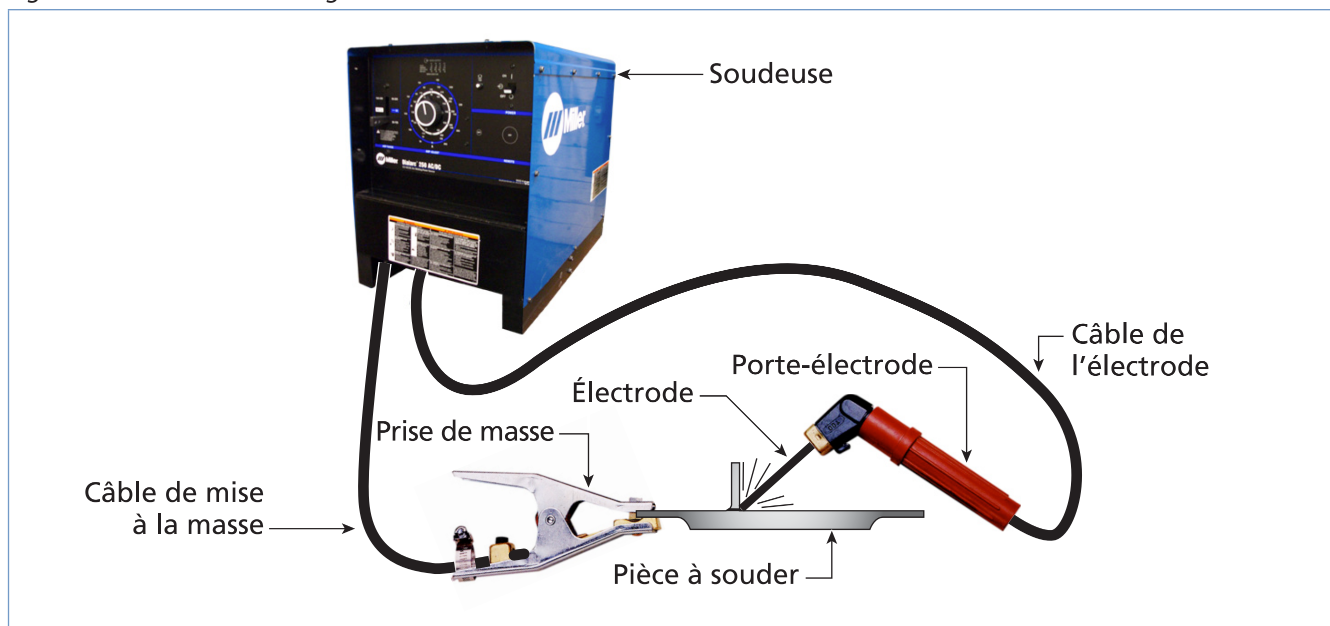
Les procédés de soudage présentés dans ce chapitre sont des procédés de soudage à l'arc manuels ou semi-automatiques. Un procédé de soudage implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé de soudage comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné. Ainsi, après avoir identifié le bon procédé de soudage à utiliser, il reste plusieurs paramètres à déterminer tels que le choix du métal d'apport, l'intensité du courant ou de la tension, le type de courant et de polarité (pour le courant continu – CC (*DC*)), le choix d'un gaz protecteur (s'il y a lieu), la vitesse de dévidage du fil-électrode (s'il y a lieu), l'élaboration de la séquence de soudage et, enfin, la technique de soudage (mouvement oscillatoire, angle de l'électrode, etc.).

Procédés de soudage à l'arc

Le terme « soudage à l'arc » définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil-électrode). La chaleur de l'arc peut varier entre 3 500 et 5 550 °C. Le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion.

Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage (figure 2.1).

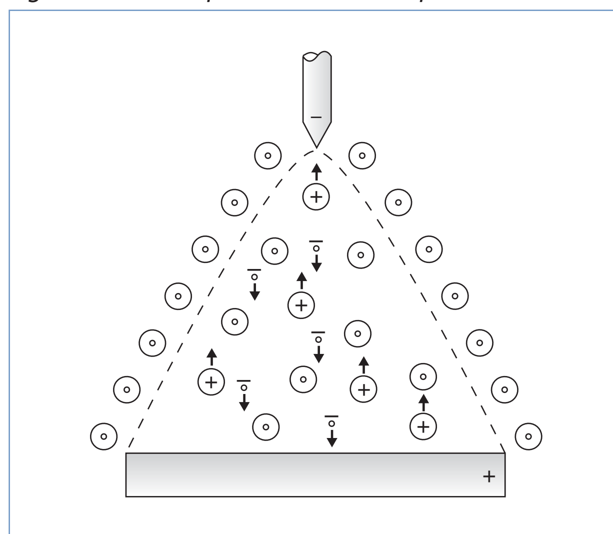
Figure 2.1 Circuit de soudage à l'arc



Un arc électrique est donc un gaz ionisé dans lequel circule un courant électrique ; l'arc se forme entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder, comme l'illustre la figure 2.2.

Dans un procédé de soudage à l'arc, on utilise aussi souvent un flux solide ou en poudre ou un gaz, qui sert à protéger le bain de fusion de l'air ambiant.

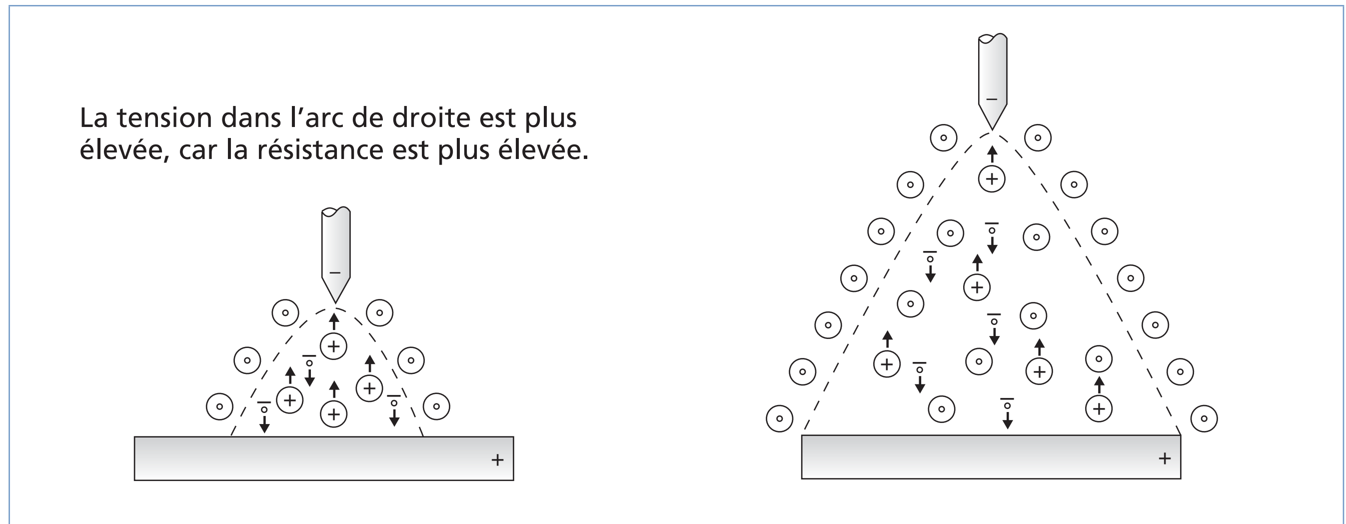
Figure 2.2 Principe d'un arc électrique



Notions d'électricité

La tension présente dans l'arc électrique dépend de l'intensité du courant et de la résistance. La résistance, à l'intérieur de l'arc, est essentiellement créée par l'air à travers lequel passe le courant. Ainsi, pour un courant donné, plus l'espace est grand (c'est-à-dire plus la longueur de l'arc est grande), plus la tension sera élevée (figure 2.3).

Figure 2.3 Arcs de même intensité mais de longueurs différentes



L'équation illustrant la relation entre la tension (*E*), l'intensité du courant (*I*) et la résistance (*R*) est la suivante : $E = RI$

Avec cette équation, on peut aussi déduire que si la tension est constante, l'intensité du courant diminuera à mesure que la résistance augmentera.

L'énergie de l'arc dépend également de la tension. L'énergie par unité de temps (c'est-à-dire la puissance) est égale à la tension multipliée par l'intensité du courant : $P = EI$

La chaleur atteinte dans l'arc dépend donc de ces deux paramètres. Plus l'intensité du courant et la tension seront élevées, plus la chaleur libérée sera grande.



Exercice 2.1

1. Si la résistance du circuit est de 55 Ω et que la tension est de 60 V, quel sera le courant obtenu ?

   a) 1,1 A ☐
   b) 1,3 A ☐
   c) 3 100 A ☐
   d) 3 300 A ☐

2. Si on obtient un courant de 110 A et que la tension est de 85 V, quelle sera la résistance du circuit ?

   a) 0,69 Ω ☐
   b) 0,77 Ω ☐
   c) 9 350 Ω ☐
   d) 9 550 Ω ☐

3. Quelle sera la tension nécessaire pour faire circuler un courant de 150 A dans une électrode, sachant que la source de courant possède une puissance de 3 000 W ?

   a) 4,5 V ☐
   b) 12 V ☐
   c) 20 V ☐
   d) 24,5 V ☐

4. Vrai ou faux ?

	Vrai	Faux
a) Quand la longueur de l'arc augmente, sa résistance diminue.	☐	☐
b) Un arc se forme parce que le gaz est ionisé.	☐	☐
c) Si le courant demeure constant, la tension diminue lorsque la résistance augmente.	☐	☐
d) La chaleur dans l'arc ne dépasse jamais 5 000 °C.	☐	☐

Caractéristiques des soudeuses à l'arc

La majorité des soudeuses à l'arc appartiennent à l'une ou l'autre des catégories suivantes :

– les soudeuses à courant constant (CC) ;
– les soudeuses à voltage (tension ou potentiel) constant (VC).

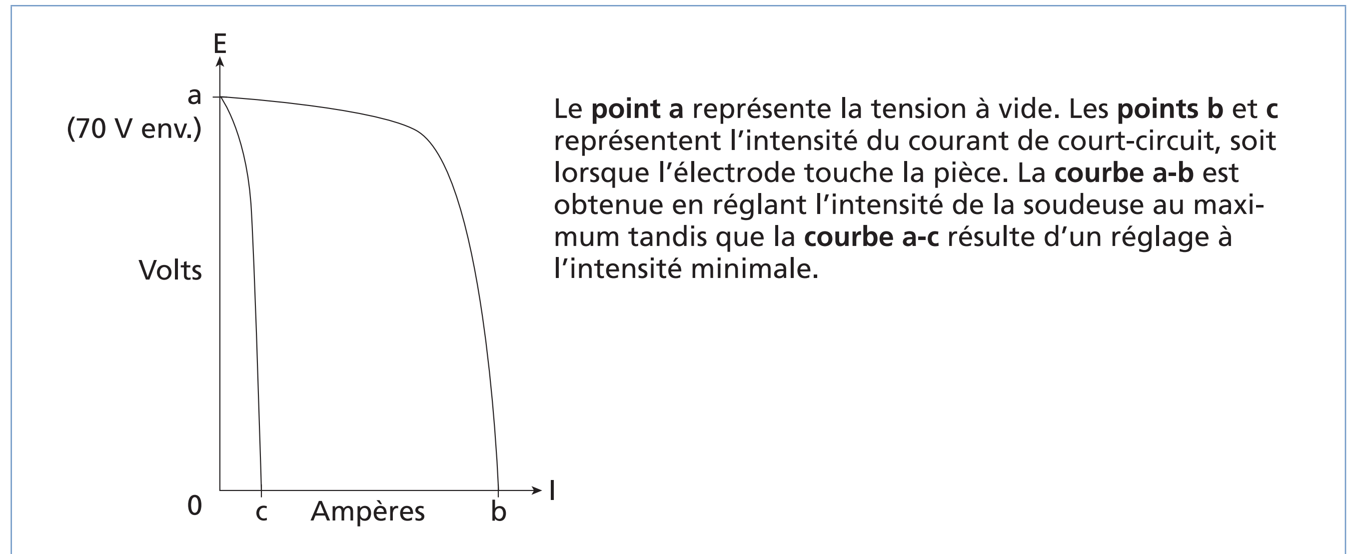
Soudeuses à courant constant

Cette première catégorie de soudeuses produit un courant constant : ainsi, la variation de la longueur de l'arc influe peu sur l'intensité du courant. De plus, celle-ci fournit une chaleur constante.

Les procédés de soudage manuels tels que SMAW ou GTAW bénéficient du courant constant.

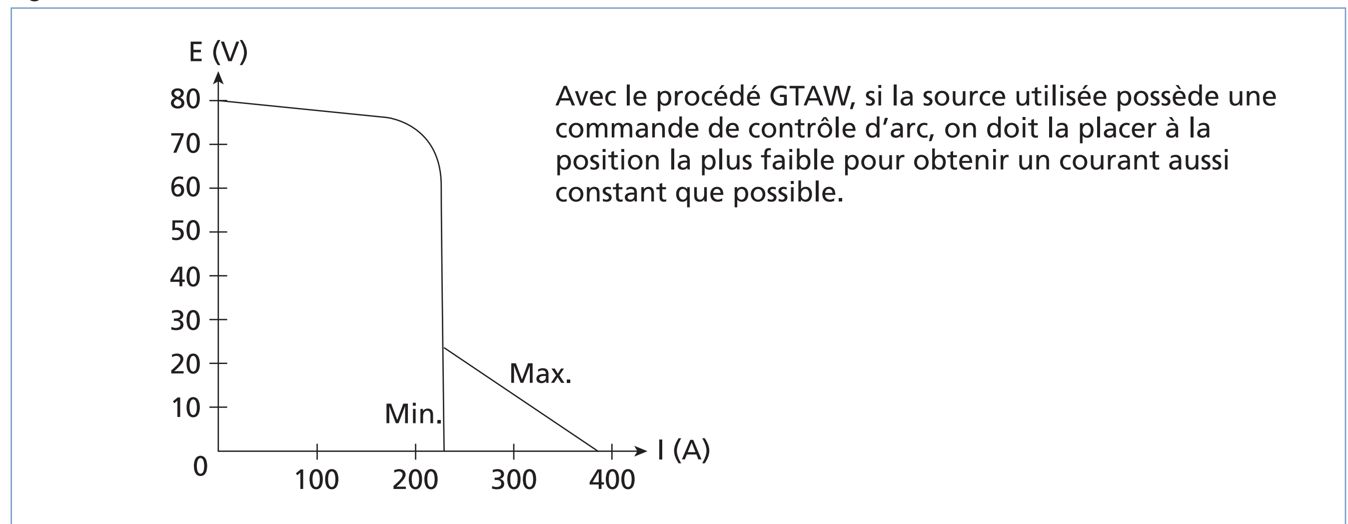
En général, il existe une petite variation du courant lorsque la longueur de l'arc est modifiée, ce qui permet aux soudeurs de pouvoir réagir de manière efficace (figure 2.4). Cette caractéristique est utile lorsqu'on travaille avec le procédé SMAW, car cela permet à l'électrode de ne pas coller sur la plaque : si l'électrode s'approche trop de la plaque, le courant augmente un peu ; de même, si l'électrode s'éloigne, le courant diminue et cela évite un surplus de projections.

Figure 2.4 Courbes caractéristiques minimales et maximales des soudeuses à courant constant (courbes tombantes)



Les nouvelles soudeuses à commande électronique, par contre, produisent un courant parfaitement constant en tout temps (figure 2.5). Ceci permet le soudage de tôles minces, notamment avec le procédé GTAW, en évitant le défoncement des tôles et la fonte de l'électrode de tungstène. Ces machines possèdent un contrôle (contrôle d'arc ou *arc control*) permettant de conserver le courant parfaitement constant ou légèrement variable selon le procédé utilisé.

Figure 2.5 Courbe tension-intensité avec contrôle d'arc



Cette catégorie de soudeuses peut être à courant continu ou alternatif. Le principal avantage des soudeuses à courant alternatif est qu'elles ne provoquent pas de soufflage de l'arc.

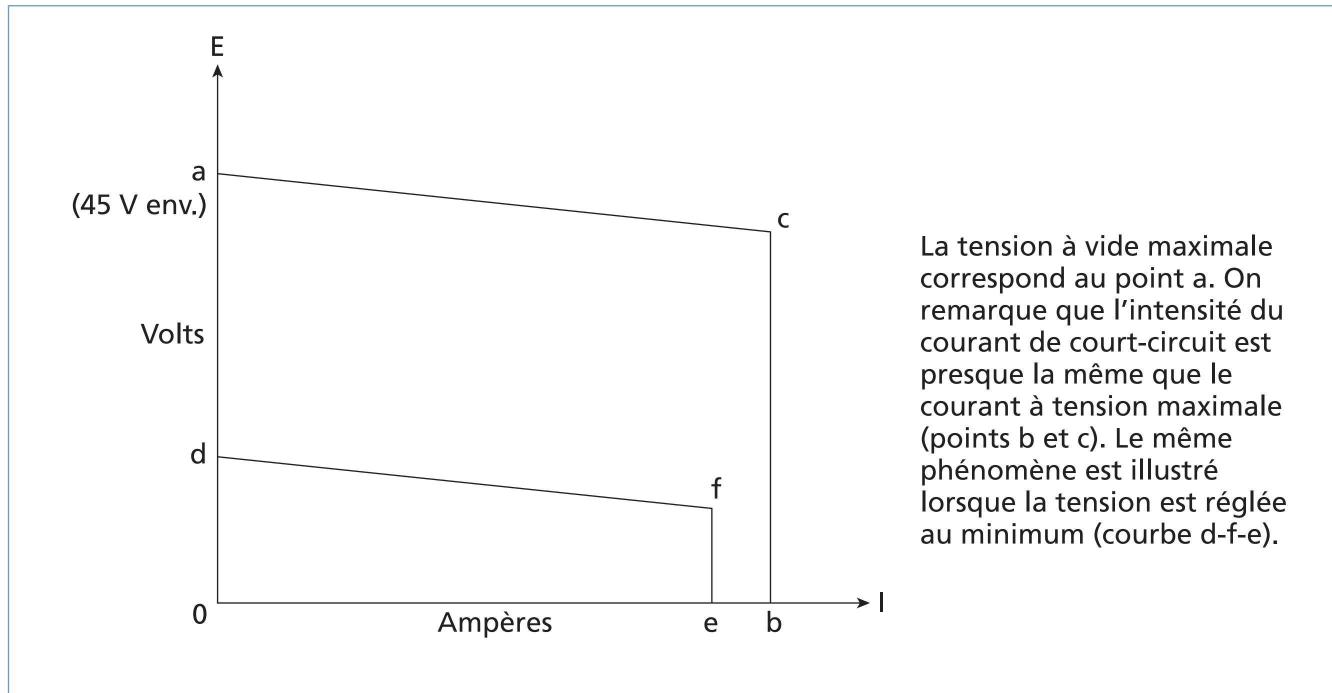
Ce ne sont pas tous les procédés, voire même toutes les électrodes, qui sont compatibles avec le courant alternatif. Celui-ci est presque toujours utilisé pour le soudage de métaux légers, comme l'aluminium ou le magnésium avec le procédé GTAW.

Il faut noter que l'arc créé par les soudeuses à courant continu est très stable.

Soudeuses à potentiel constant

Les soudeuses à potentiel constant produisent une tension constante ; cependant, l'intensité du courant varie (figure 2.6). Cette variation de courant fait fondre le fil-électrode plus ou moins rapidement, pour assurer que la longueur de l'arc reste constante. Cette seconde catégorie de soudeuses s'utilise généralement avec des procédés de soudage semi-automatiques tels que le GMAW, le FCAW ou le MCAW.

Figure 2.6 Courbes caractéristiques minimale et maximale des soudeuses à potentiel constant (courbes horizontales)



La tension à vide maximale correspond au point a. On remarque que l'intensité du courant de court-circuit est presque la même que le courant à tension maximale (points b et c). Le même phénomène est illustré lorsque la tension est réglée au minimum (courbe d-f-e).

Certaines soudeuses peuvent être à courant constant et à potentiel constant. On sélectionne alors le mode de fonctionnement désiré.

Types de courant

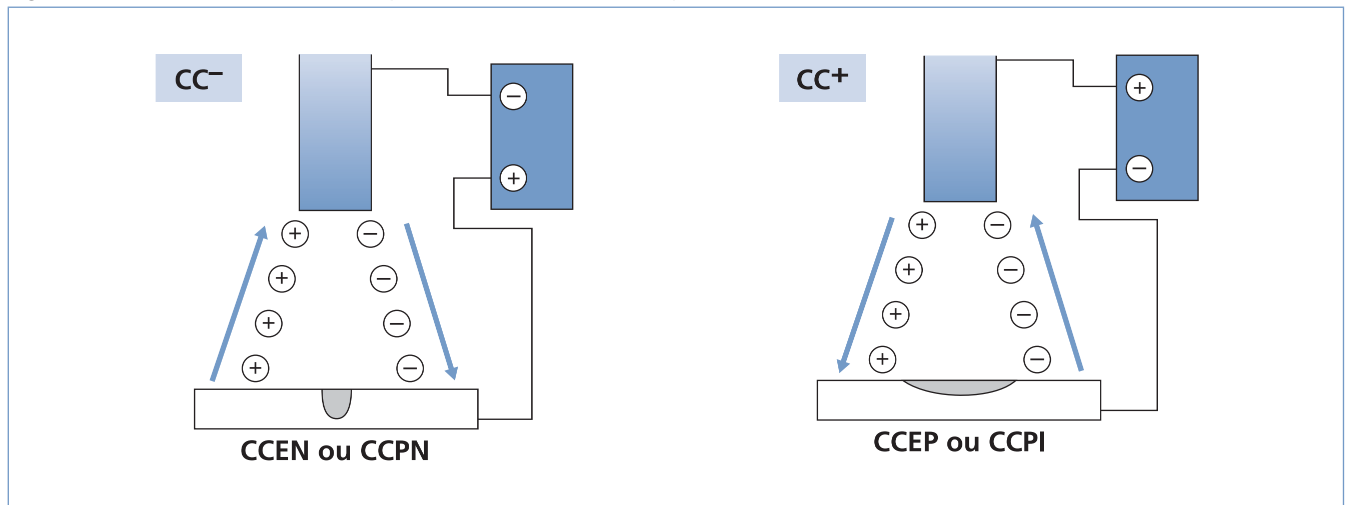
En soudage, on peut utiliser un courant continu ou alternatif. Le courant continu est le plus répandu, car il assure une alimentation de courant constante, donc la stabilité de l'arc. Ce qui n'est pas le cas du courant alternatif ; en effet, celui-ci possède un cycle durant lequel l'intensité du courant atteint la valeur de 0.

Lorsqu'une pièce est prête à être soudée, elle fait partie d'un circuit électrique incluant l'électrode. C'est ce circuit, comportant une borne négative et une borne positive, qui permet la création de l'arc électrique.

Avec le soudage en courant continu, lorsque la pièce est branchée au pôle positif et que le câble de l'électrode est branché au pôle négatif, on parle de polarité normale (CCPN) ou encore de courant continu à électrode négative (CCEN).

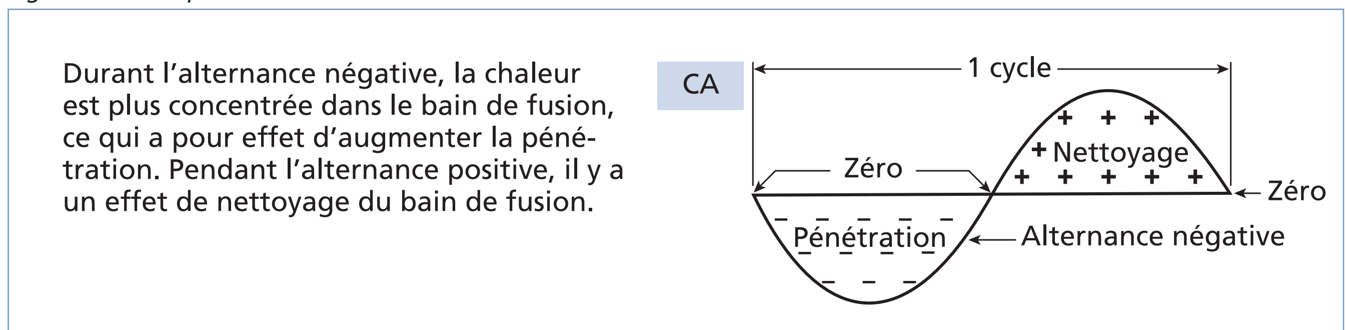
À l'inverse, si le câble de l'électrode est relié au pôle positif et la pièce à souder au pôle négatif, on parle de polarité inversée (CCPI) ou encore de courant continu à électrode positive (CCEP) (figure 2.7).

Figure 2.7 Courant continu avec polarité normale et avec polarité inversée



Lorsqu'on travaille avec du courant alternatif, le courant oscille et passe de positif à négatif dans la pièce à souder et dans l'électrode (figure 2.8). La chaleur est distribuée également entre les deux pôles ; donc, la pièce reçoit 50 % de la chaleur.

Figure 2.8 Fréquence normale du courant alternatif



Si le courant utilisé est continu, la chaleur ne se distribue pas également. En effet, elle se concentre surtout du côté de la borne positive (70 %), tandis que la borne négative ne reçoit que 30 % de la chaleur. C'est une particularité importante lorsqu'on travaille avec du courant continu, car la fabrication du circuit (avec polarité normale ou inversée) affecte la chaleur que reçoit la pièce, donc la qualité de la soudure (figure 2.9).

Figure 2.9 Répartition de la chaleur entre la pièce et l'électrode en fonction du courant

	Courant alternatif (CA)	Courant continu (CC)	
		Polarité normale	Polarité inversée
Chaleur sur la pièce (%)	50	70	30
Chaleur de l'électrode (%)	50	30	70



Exercice 2.2

1. Dans la figure 2.10, associez la bonne définition à la réponse correspondante.

Figure 2.10

Définitions		Choix de réponse
a) Type de courant qui circule toujours dans le même sens, avec la même intensité.	☐	1. Polarité normale
b) Type d'ajustement sur une soudeuse permettant de conserver le courant parfaitement constant ou légèrement variable, selon le procédé utilisé.	☐	2. Alternatif
c) Mode de distribution de la chaleur associé au courant alternatif	☐	3. Pièce-électrode: 30 % – 70 %
d) Type de courant qui oscille et passe constamment du positif au négatif.	☐	4. Soudeuse à potentiel constant
e) Type de circuit en courant continu où la pièce correspond au pôle positif.	☐	5. Continu
f) Type de soudeuse à courbe horizontale	☐	6. Soudeuse à courant constant
g) Mode de distribution de la chaleur associé à la polarité normale	☐	7. Contrôle de l'arc
h) Type de circuit en courant continu où l'électrode correspond au pôle positif.	☐	8. Pièce-électrode: 70 % – 30 %
i) Mode de distribution de la chaleur associé à la polarité inversée	☐	9. Polarité inversée
j) Type de soudeuse à courbe tombante	☐	10. Pièce-électrode: 50 % – 50 %

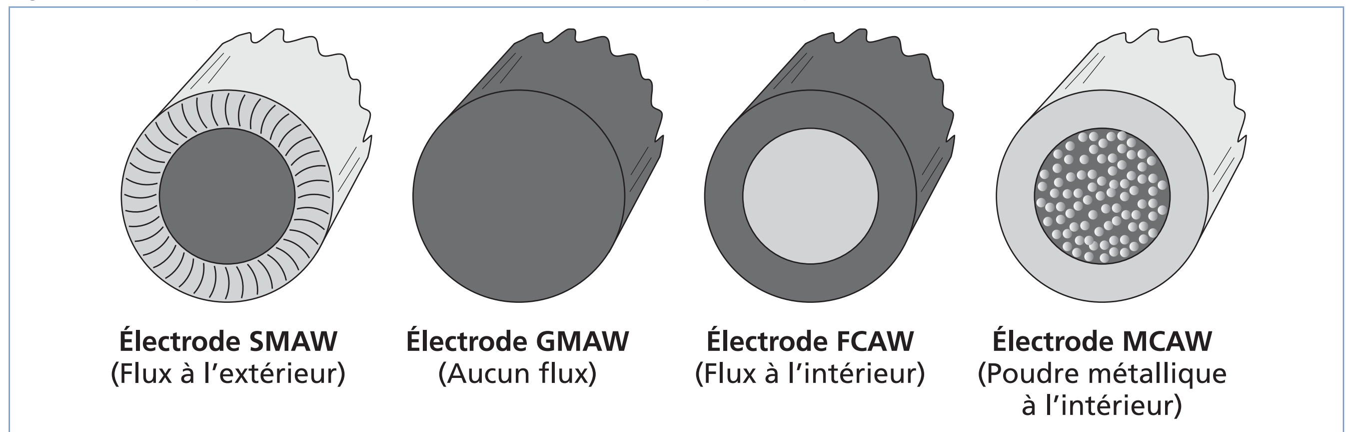
2. Lequel des facteurs suivants constitue **le facteur principal** à considérer lors du choix d'une soudeuse ?

   a) L'épaisseur de la pièce ☐
   b) Le temps disponible ☐
   c) Le métal d'apport ☐
   d) Le procédé de soudage utilisé ☐
   e) Le type de courant utilisé ☐
   f) La couleur du métal de base ☐

Métaux d'apport

Le métal d'apport provient généralement d'une électrode enrobée (pour le procédé SMAW), d'un fil-électrode (dans le cas des procédés GMAW, FCAW et MCAW) (figure 2.11) ou d'une baguette (procédé GTAW). La classification des métaux d'apport permet de connaître leur résistance à la traction, leur composition chimique, la résilience du métal déposé et les positions de soudage possibles.

Figure 2.11 Comparaison des électrodes et des fils-électrodes pour les procédés SMAW, GMAW, FCAW et MCAW



Principaux facteurs influant sur le choix d'un métal d'apport

La figure 2.12 présente certains des principaux facteurs à considérer lors du choix d'un métal d'apport.

Figure 2.12 Principaux facteurs influant sur le choix d'un métal d'apport

Facteur	Impact sur le choix d'un métal d'apport
Composition du métal de base	– On recherche un métal d'apport de même nature.
Dimensions de l'assemblage	– Pour les très gros assemblages, les taux de dépôt doivent être élevés.
Genre de courant disponible	– Plusieurs électrodes sont conçues pour le courant continu.
Position du joint à souder	– En fonction de la fluidité du métal d'apport
Propriétés requises pour le cordon de soudure	– Absence de fusion d'hydrogène (surtout pour l'acier) – On considère aussi le nombre de passes, le diamètre de l'électrode et l'intensité de courant.

On choisit également une électrode en fonction de la charge de rupture du métal déposé.

Flux et gaz protecteurs

Rôle et caractéristiques des flux

Le flux et le laitier jouent quatre rôles distincts dans la réalisation d'une soudure (figure 2.13).

Figure 2.13 Rôle du flux et du laitier

Rôle	Description
Rôle électrique	– Conduire le courant électrique lorsqu'il est chaud et isoler lorsqu'il est froid. – Stabiliser et influencer la force de l'arc.
Rôle physique	– Protéger le bain de fusion de l'oxygène et de l'azote contenus dans l'air ambiant afin d'éviter que les propriétés mécaniques du métal déposé soient dégradées (désoxydation et dénitruration). – Protéger le soudeur du rayonnement UV en masquant l'arc électrode. – Produire un gaz de protection sous l'effet de la chaleur de l'arc.
Rôle métallurgique	– Désoxyder et purifier le bain de fusion afin d'empêcher la formation de soufflures dans celui-ci. – Ajouter des éléments d'alliage au bain de fusion. – Refroidir plus lentement le bain de fusion (cordon).
Rôle mécanique	– Soutenir et donner une forme au bain de fusion (influe sur la fluidité du bain de fusion).

Le flux forme le laitier qui, une fois déposé, protège la soudure contre l'oxydation pendant le processus de solidification et de refroidissement. Certains éléments contenus dans le flux facilitent aussi l'enlèvement du laitier, en affectant son adhérence au cordon.

La nature du flux a une influence sur la pénétration et le taux de dépôt. Selon le flux sélectionné, on peut accroître aussi les positions de soudage possibles, l'apparence et la composition du cordon, l'intensité du courant nécessaire et les propriétés mécaniques du cordon de soudure.

On reconnaît généralement trois types de flux (basique, rutile (ou acide) et cellulosique) (figure 2.14).

Figure 2.14 Caractéristiques générales des types d'électrodes

Propriété ou condition d'application	Basique	Rutile	Cellulosique
Profondeur de pénétration	2	3	1
Passes de remplissage	2	1	3
Aspect du cordon	2	1	3
Facilité d'amorçage	3	1	2
Facilité d'exécution à plat	2	1	3
Facilité d'exécution/autres positions	1	2	3
Faible teneur en humidité	1	2	3
Soudabilité sur aciers trempés	1	2	3
Propriétés mécaniques (en général)	1	3	2
Disponibilité pour le soudage d'aciers alliés	1	non	2
1 = excellent 2 = bien 3 = passable			

La composition exacte des flux est généralement connue des fabricants seulement. Cependant, certains éléments s'y retrouvent fréquemment et remplissent une fonction particulière (figure 2.15).

Figure 2.15 Éléments entrant dans la composition des flux

Élément	Principaux rôles
Aluminium	Désoxydant
Calcium	Procure la protection gazeuse et forme le laitier.
Carbone	Augmente la dureté et la résistance à la traction.
Chrome	Augmente la dureté et la résistance à la corrosion.
Fer	Est la base des alliages ferreux.
Manganèse	Désoxydant, empêche la fissuration à chaud.
Molybdène	Augmente la résistance à la traction, y compris à chaud.
Nickel	Améliore la résilience, la résistance à la traction et à la corrosion.
Potassium	Stabilise l'arc et forme le laitier.
Silicium	Désoxydant, forme le laitier.
Sodium	Stabilise l'arc et forme le laitier.
Titane	Désoxydant et dénitrurant, forme le laitier (diminue la tension superficielle).
Zirconium	Désoxydant
Vanadium	Augmente la résistance à la traction.

Rôle et caractéristiques des gaz protecteurs

Les gaz servent généralement à protéger le bain de fusion de l'air ambiant, notamment afin d'éviter le phénomène d'oxydation.

On utilise différents types de gaz dont les gaz neutres (comme l'argon ou l'hélium) et les gaz actifs (comme le gaz carbonique (CO_2), l'hydrogène (H) ou l'azote (N)), chaque gaz ayant des propriétés spécifiques (figure 2.16). Les gaz neutres sont inertes (ne réagissent pas chimiquement avec d'autres éléments) et ont notamment l'avantage de neutraliser les émissions de vapeurs toxiques causées par certains procédés (comme le GTAW).

Figure 2.16 Propriétés de différents gaz de protection

Gaz	Propriétés
Argon (Ar)	– Potentiel d'ionisation bas – Permet de souder avec une forte intensité (à 80 % et plus). – Beaucoup de soufflage de l'arc – Peu de projections – Pénétration étroite – Bonne stabilité de l'arc
Hélium (He)	– Potentiel d'ionisation élevé (haute tension) – Stabilité de l'arc moins grande qu'avec l'argon – Cordon de soudure large – Bon mouillage avec des plaques épaisses d'aluminium
Gaz carbonique (CO_2)	– Se mélange à l'argon (à un maximum de 25 %). – Bonne densité de soudure – Peu de soufflage de l'arc – Beaucoup de projections – Grande surépaisseur du cordon – Bon mouillage du cordon – Soluble dans les métaux en fusion – Oxydant et carburant (Il forme de l'oxygène (O_2) et du monoxyde de carbone (CO); ces deux gaz réagissent avec les métaux libérés dans la fumée.) – Diminue la stabilité de l'arc. – S'utilise seulement avec l'acier au carbone et faiblement allié. – Ne s'utilise qu'avec les procédés GMAW, FCAW ou MCAW.
Hydrogène (H)	– Soluble dans les métaux en fusion – S'emploie avec l'argon et le CO_2 pour souder l'acier inoxydable. – Réducteur
Oxygène (O)	– Bon mouillage pour le soudage de l'acier – Très soluble dans les métaux en fusion – Peut diminuer les éléments d'alliage dans l'acier. – Se combine à l'argon (à un maximum de 5 %).

Les gaz de protection influent, notamment, sur les propriétés suivantes d'une soudure :
- la composition chimique ;
- les propriétés mécaniques ;
- le profil du cordon de soudure (pénétration et surépaisseur) ;
- la compacité ;
- le mouillage ;
- la présence ou l'absence d'oxydation de surface.



Exercice 2.3

1. Dans la figure 2.17, associez chacun des procédés de soudage à la provenance du métal d'apport utilisé.

Figure 2.17

Procédé		Provenance du métal d'apport
a) SMAW	☐	1. Baguette
b) GTAW	☐	2. Fil à centre métallique
c) GMAW	☐	3. Fil fourré avec flux
d) FCAW	☐	4. Électrode enrobée
e) MCAW	☐	5. Fil plein

2. Parmi les facteurs suivants, cochez ceux qui ne constituent pas des facteurs à considérer lors du choix d'un métal d'apport.

   a) La charge de rupture minimale du cordon ☐
   b) La dimension de l'assemblage ☐
   c) Le poids de l'assemblage ☐
   d) Le type de courant disponible ☐
   e) La température du métal de base ☐
   f) La brillance du métal de base ☐
   g) La composition du métal de base ☐
   h) La position du joint à souder ☐
   i) Le type de soudeuse utilisée ☐

3. Vrai ou faux ?

	Vrai	Faux
a) Le laitier protège la soudure contre l'oxydation.	☐	☐
b) Le flux sert à faire fondre le métal d'apport.	☐	☐
c) Le laitier solidifie la soudure.	☐	☐
d) Le laitier peut servir de coffrage au cordon de soudure.	☐	☐

4. Dans la figure 2.18, associez les caractéristiques de la colonne de gauche aux électrodes de la colonne de droite. Une même réponse peut convenir à plusieurs énoncés.

Figure 2.18

Caractéristiques		Électrodes
a) Amorce facilement.	☐	1. Cellulosique
b) Ses composants agissent comme désoxydants et éliminent le soufre et le phosphore du métal fondu.	☐	2. Rutile
c) Produit un arc fort, directionnel et une forte pénétration.	☐	3. Basique
d) Produit un cordon de soudure à l'apparence rugueuse et des stries démarquées.	☐	
e) N'émet aucun gaz dans l'arc.	☐	
f) Produit une pénétration moyenne et une couche de laitier de faible à moyenne.	☐	

5. Quels sont les facteurs qui influencent le choix d'un gaz de protection ou d'un type de flux ?

____

____

____

____

6. Dans la figure 2.19, associez chacune des propriétés suivantes au gaz de protection correspondant.

Figure 2.19

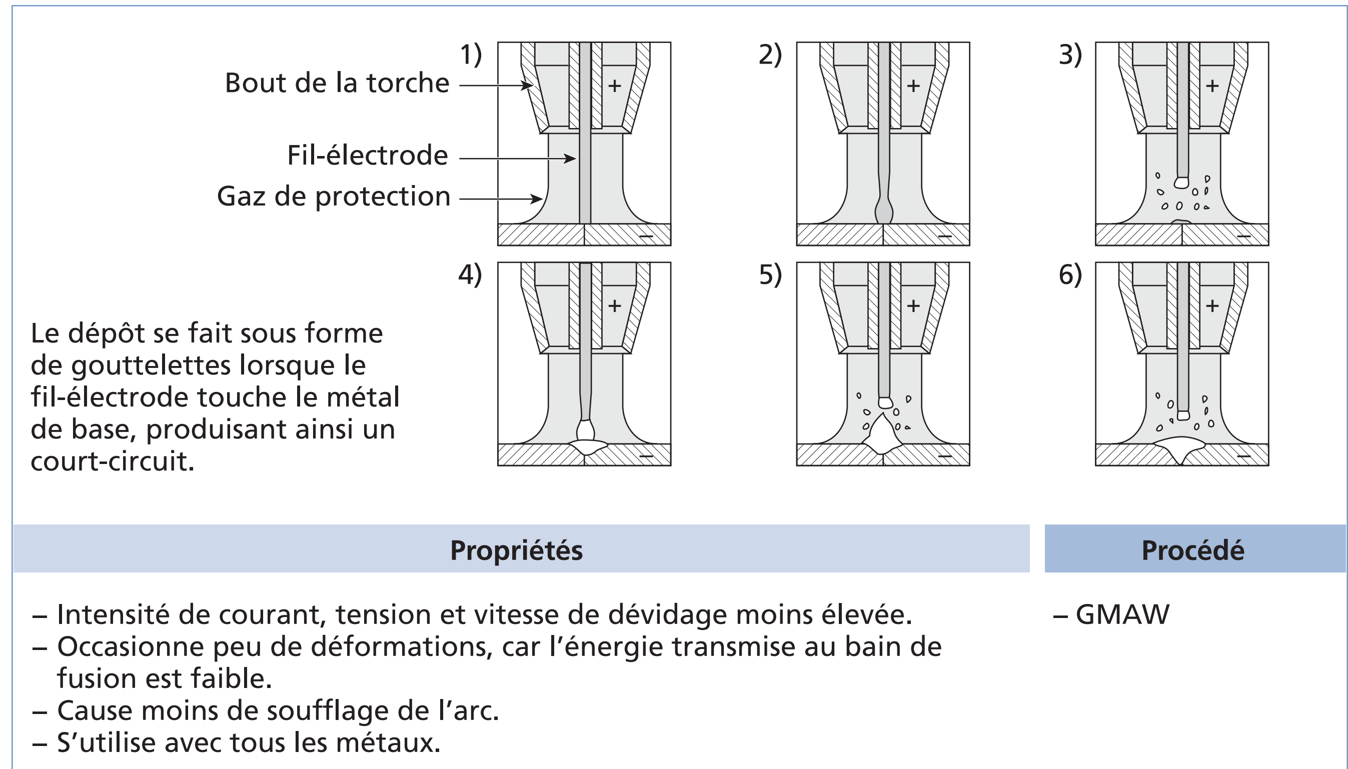
Propriétés		Gaz de protection
a) Gaz ayant un potentiel d'ionisation élevé (haute tension) et créant des soudures larges.	☐	1. Argon (Ar)
b) Gaz qui possède une grande solubilité dans les métaux en fusion et qui, combiné à d'autres, procure un bon mouillage pour le soudage de l'acier.	☐	2. Gaz carbonique (CO_2)
c) Gaz possèdant un potentiel d'ionisation bas et causant beaucoup de soufflage de l'arc mais peu de projections.	☐	3. Hélium (He)
d) Gaz oxydant et carburant mais qui diminue la stabilité de l'arc; utilisé seulement avec l'acier au carbone et faiblement allié.	☐	4. Hydrogène (H)
e) Gaz réducteur se combinant à d'autres gaz, notamment pour le soudage de l'acier inoxydable.	☐	5. Oxygène (O_2)

Modes de transfert

Il existe différentes façons de transférer le métal d'apport au bain de fusion. Selon le procédé de soudage utilisé, le mode de transfert sera évident (par exemple, pour certains procédés, notamment les procédés à électrodes, on utilise toujours le même mode) ou devra être sélectionné afin d'obtenir le résultat escompté (notamment lorsqu'on utilise des fils-électrodes). On distingue généralement quatre modes de transfert distincts présentés dans les figures 2.20 à 2.23.

Il existe un autre mode de transfert très récent soit le mode de transfert à froid (CMT ou *Cold Metal Transfer*). Celui-ci a été développé par Fronius Internation GmbH. Il vise à permettre de souder des pièces minces sans transfert important de chaleur ce qui réduit le temps de refroidissement et les déformations. Le procédé nécessite l'utilisation de gaz neutre (procédé MIG). Il exige aussi un équipement complexe permettant d'interrompre le courant à intervalles tout en rétractant le fil-électrode pour éviter qu'il ne touche le métal de base et colle. Il a des applications intéressantes pour le soudage de l'acier et pour souder l'acier à l'aluminium.

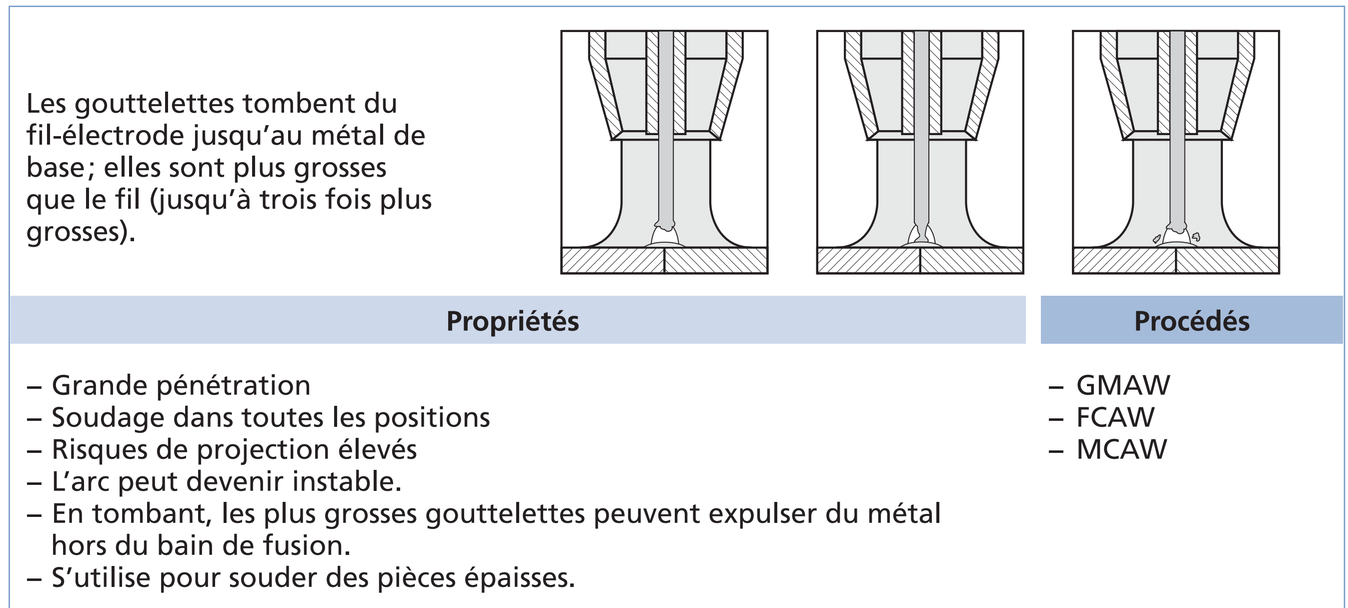
Figure 2.20 Mode de transfert par court-circuit



Le dépôt se fait sous forme de gouttelettes lorsque le fil-électrode touche le métal de base, produisant ainsi un court-circuit.

Propriétés	Procédé
– Intensité de courant, tension et vitesse de dévidage moins élevée. – Occasionne peu de déformations, car l'énergie transmise au bain de fusion est faible. – Cause moins de soufflage de l'arc. – S'utilise avec tous les métaux.	– GMAW

Figure 2.21 Mode de transfert globulaire



Les gouttelettes tombent du fil-électrode jusqu'au métal de base; elles sont plus grosses que le fil (jusqu'à trois fois plus grosses).

Propriétés	Procédés
– Grande pénétration – Soudage dans toutes les positions – Risques de projection élevés – L'arc peut devenir instable. – En tombant, les plus grosses gouttelettes peuvent expulser du métal hors du bain de fusion. – S'utilise pour souder des pièces épaisses.	– GMAW – FCAW – MCAW

Figure 2.22 Mode de transfert par pulvérisation axiale

Il est caractérisé par de fines gouttelettes qui s'échappent régulièrement du fil-électrode pour tomber sur le métal de base formant une sorte de pluie.

Propriétés	Procédés
– Nécessite une intensité assez élevée (courant de transition en deçà duquel ce mode de transfert est impossible) et une tension plus élevée. – Le gaz de protection doit contenir un minimum de 80 % d'argon. – Arc très chaud et rigide – Taux de dépôt élevé – Soudures lisses et sans projection – Plus approprié aux pièces épaisses (3 mm ou plus), car le bain de fusion est plus large et plus fluide. – L'arc est plus vulnérable au soufflage. – Exige aussi un assemblage précis, sans écartement des pièces. – Est presque toujours utilisé pour le soudage de métaux non ferreux légers comme l'aluminium ou le magnésium.	– GMAW – FCAW – MCAW

Figure 2.23 Mode de transfert pulsé

Ce mode de transfert réunit les caractéristiques de transfert par court-circuit et par pulvérisation axiale.

Propriétés	Procédés
– Nécessite deux intensités de courant distinctes, un courant de fond (*background*) qui permet de maintenir l'arc mais insuffisant pour faire fondre le métal, et un courant de crête (*peak*) qui survient périodiquement. – Le courant de crête permet la déposition des gouttes sur le métal de base, à intervalles réguliers. – Le bain de fusion refroidit légèrement entre chaque déposition de métal ce qui permet de souder des plaques minces avec un minimum de déformations. – Est très polyvalent et peut être utilisé pour souder des pièces de toutes épaisseurs et dans toutes les positions. – Coûts de l'équipement plus élevés – Certains fils de petits diamètres sont de plus en plus utilisés avec ce mode de transfert (surtout avec MCAW). – Paramètres plus difficiles à régler	– GMAW – MCAW

Il existe un autre mode de transfert très récent, soit le mode de transfert à froid *(*CMT ou *Cold Metal Transfer)*. Celui-ci a été développé par Fronius Internation GmbH. Il vise à permettre de souder des pièces minces sans transfert important de chaleur, ce qui réduit le temps de refroidissement et les déformations. Le procédé nécessite l'utilisation de gaz neutres (procédé MIG). Il exige aussi un équipement complexe permettant d'interrompre le courant à intervalles tout en rétractant le fil-électrode pour éviter qu'il ne touche le métal de base et colle. Il a des applications intéressantes pour le soudage de l'acier et pour souder l'acier à l'aluminium.



Exercice 2.4

1. Dans la figure 2.24, associez les caractéristiques suivantes au mode de transfert correspondant.

Figure 2.24

Caractéristiques		Mode de transfert
a) Mode de transfert nécessitant deux intensités de courant distinctes	☐	1. Court-circuit
b) Mode de transfert transférant une faible quantité de chaleur à la pièce, occasionnant moins de déformations	☐	2. Transfert globulaire
c) Mode de transfert déposant, sous l'effet de la gravité, de grosses gouttelettes pour former le cordon de soudure	☐	3. Pulvérisation axiale
d) Mode de transfert exclusif au procédé GMAW	☐	4. Pulsé
e) Mode de transfert presque toujours utilisé pour le soudage de métaux non ferreux	☐	
f) Mode de transfert permettant une grande pénétration, mais avec un risque de projections élevé	☐	
g) Mode de transfert déposant de fines gouttelettes pour former le cordon de soudure	☐	
h) Mode de transfert qui permet au bain de fusion de refroidir entre chaque déposition de métal, limitant ainsi les déformations	☐	

Procédés de soudage

La réalisation d'une soudure peut se décomposer en sept étapes présentées dans la figure 2.25.

Figure 2.25

Étapes d'un procédé de soudage
1. Identification du métal de base
2. Détermination de l'épaisseur du métal, de la position de soudage et du niveau de qualité requis
3. Sélection du procédé et préparation des pièces et de l'équipement
4. Choix du gaz de protection, de l'électrode, du fil-électrode ou du métal d'apport et du mode de transfert (au besoin)
5. Réglage des paramètres (tension, intensité, vitesse de dévidage, débit de gaz, etc.)
6. Exécution de la soudure en maintenant la vitesse d'avance, l'angle et la longueur d'arc appropriés
7. Évaluation de la soudure

La sélection d'un procédé de soudage dépend donc du métal de base, de l'épaisseur des pièces à souder, de la position de soudage, du niveau de qualité requis et du type de préparation des joints effectuée. Cependant, le choix du gaz de protection (s'il y a lieu), de l'électrode, du fil-électrode ou du métal d'apport et le réglage des paramètres dépendent du procédé sélectionné, en plus des autres facteurs mentionnés précédemment.

Cinq procédés de soudage à l'arc différents sont présentés ici. Parmi ceux-ci, certains sont recommandés pour un type de métal en particulier (figure 2.26).

Figure 2.26 Procédés de soudage recommandés pour certains métaux

	SMAW	GTAW	GMAW	FCAW	MCAW
Fonte	1		1**		
Cuivre et ses alliages	2	1	1		
Acier	1	1	1	1	1
Magnésium	3	1	1		
Aluminium	3	1	1		
Titane		1	2		
Nickel	2	1	1		

** Bronze au silicium comme métal d'apport

1 : Très utilisé 2 : Moyennement utilisé 3 : Peu utilisé

Lors du choix du procédé de soudage, on peut aussi considérer si l'on veut travailler avec un procédé manuel (SMAW, GTAW) ou semi-automatique (GMAW, FCAW ou MCAW). Ce choix peut dépendre, par exemple, de la position de soudage, car les procédés semi-automatiques ne sont pas tout à fait aussi polyvalents à ce niveau. Par contre, ils procurent une qualité de soudure souvent supérieure. Le tableau de la figure 2.27 expose les avantages de chacun des procédés.

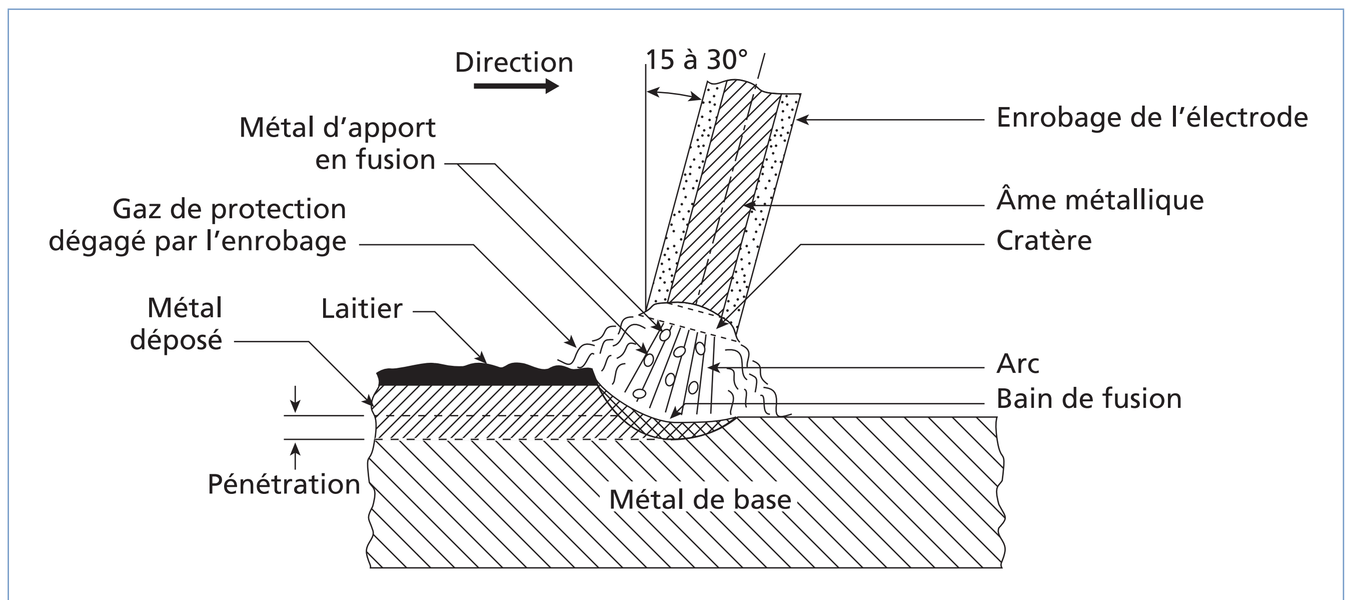
Figure 2.27 Avantages des procédés de soudage manuels et semi-automatiques

	Manuels	Semi-automatiques
Avantages	SMAW : – Plus polyvalents, s'exécutent dans tous les milieux. – Équipement moins complexe et moins dispendieux – Équipement moins encombrant GTAW : – Soudage de précision – Soudage de presque tous les métaux (incluant les métaux de faible soudabilité) – Aspect et esthétique de la soudure	– Taux de dépôt élevé – Meilleures propriétés mécaniques et chimiques de la soudure – Fatigue moindre du soudeur – Temps de formation du soudeur réduit – Soudage de joints longs possible – Soudage dans toutes les positions – Économie de temps – Facteur de marche atteignant généralement 100 %

SMAW (Shielded Metal Arc Welding*)*

Le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée est relativement simple. Une soudeuse, généralement à courant constant, est connectée à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder (figure 2.28). Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique.

Figure 2.28 Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)



Ce type de soudage exige une vitesse et un angle de soudure constants, et la pointe de l'électrode doit demeurer à la même distance de la pièce. C'est la raison pour laquelle on rapproche le porte-électrode lorsque le métal fond.

◆ *Avantages et inconvénients*

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux.

Le cœfficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce cœfficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V.

◆ *Applications*

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple, des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons. Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier.

◆ *Soudeuse et type de courant utilisés*

On emploie généralement une soudeuse à courant continu avec ce type de procédé. La polarité inversée permet une plus grande pénétration de la soudure parce que le métal en fusion de l'électrode, qui se dépose sur la pièce, atteint des températures plus élevées, ce qui procure une meilleure pénétration.

◆ *Électrodes*

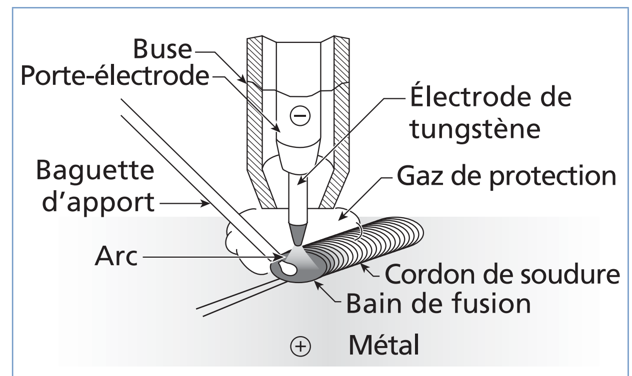
Il existe trois types d'électrodes enrobées utilisées pour le soudage SMAW. On trouve des électrodes basiques, rutiles et cellulosiques (voir tableau de la figure 2.14). Chaque électrode contient le métal d'apport en son centre et est recouverte d'un flux.

Le type de métal de base, la position de soudage, l'aspect du cordon désiré, la pénétration de soudage nécessaire sont des facteurs à considérer lors du choix de l'électrode. Les enrobages ne sont pas tous de la même épaisseur et cela influence le cordon de soudure produit.

GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou TIG (Tungsten Inert Gas)

Le procédé de soudage sous protection de gaz inerte avec électrode réfractaire de tungstène s'effectue avec une torche. Celle-ci comprend l'électrode de tungstène, maintenue sur un porte-électrode et placée à l'intérieur de la buse qui canalise le gaz de protection (figure 2.29). L'arc électrique se forme entre l'électrode de tungstène et le métal de base.

Figure 2.29 Principe du procédé GTAW



Le procédé GTAW peut se réaliser sans métal d'apport (ex. pour le soudage de plaques minces) ou en utilisant des baguettes de métal d'apport.

La torche permet de maintenir l'électrode en place, de canaliser le gaz de protection et d'assurer la continuité du courant pendant le soudage. Lorsqu'on travaille avec des courants élevés (150 A et plus), on utilise une torche refroidie par du liquide, et une torche refroidie au gaz pour des courants allant jusqu'à 150 A.



La taille de la buse de la torche augmente en fonction de l'intensité du courant.

Le GTAW pulsé implique que la soudeuse est munie d'un mode pulsé, ce qui permet au soudeur d'avoir un meilleur contrôle du bain de fusion. Cette propriété facilite le soudage en position ou le soudage de tôles très minces.

◆ *Avantages et inconvénients*

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).

Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.

La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.

On peut l'utiliser avec ou sans métal d'apport. Celui-ci, lorsque présent, prend la forme d'une baguette que l'on fait fondre au-dessus du bain de fusion.



Le procédé GTAW est rarement utilisé pour souder l'acier au carbone. Lorsqu'il l'est, il faut utiliser des baguettes d'apport contenant un désoxydant pour éviter les soufflures.

◆ *Applications*

On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteurs, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces.

Par ailleurs, le procédé GTAW pulsé (GTAW-P) est particulièrement utilisé en aéronautique, en électronique et en pétrochimie ou pour le soudage de tubes, notamment des tubes minces en position fixe.



Le procédé GTAW pulsé (GTAW-P) produit la même pénétration que le GTAW, tout en réduisant les risques de déformations et en facilitant le soudage en position.

◆ *Soudeuse et type de courant utilisés*

Avec ce type de procédé, on utilise une soudeuse à courant constant, comme pour le SMAW. Le type de courant (CA ou CC) utilisé et la polarité du courant CC affectent les caractéristiques de la soudure. On utilise généralement le courant CC avec polarité normale, car il permet un plus grand transfert de chaleur vers la pièce (les électrons bombardent la pièce, ce qui protège l'électrode) ; donc, une plus grande pénétration et une soudure plus étroite.

Le courant CC avec polarité inversée peut parfois être utilisé sur certains métaux (ex. aluminium, magnésium, cuivre), car il a la propriété de nettoyer, en les brisant, les oxydes de surface ; toutefois, la pénétration demeure plus faible et le cordon plus large. Le courant CA permet de conjuguer les avantages des deux types de courant. De plus, il existe un contrôle permettant de mettre l'accent sur l'une ou l'autre des directions du courant CA (AC-balance), pour bénéficier de l'action de nettoyage du CCPI au degré désiré.

Cependant, lors de l'utilisation du courant alternatif avec le procédé GTAW, on doit généralement s'assurer de bénéficier d'un générateur de haute fréquence afin d'éviter les interruptions, lorsque le courant passe à zéro.

Le courant CA haute-fréquence permet l'amorçage de l'arc sans contact avec l'électrode, ce qui assure moins de contamination entre l'électrode et le métal déposé et une plus grande stabilité de l'arc. Il permet aussi d'utiliser un arc plus long et augmente la durée de vie de l'électrode (jusqu'à 100 %).

Ce problème d'interruption du courant peut aussi être résolu en utilisant un courant alternatif à onde carrée, s'il est disponible. Même lors de l'utilisation d'un courant continu, on peut amorcer l'arc en utilisant un courant haute fréquence afin d'éviter le contact entre la pièce et l'électrode.

◆ *Électrodes*

On trouve neuf types d'électrodes qui, en fonction des autres métaux d'alliages, peuvent être ajoutés au tungstène. Le type et la taille des électrodes employées dépendent généralement du courant (figures 2.30 et 2.31). Les électrodes utilisées avec le courant avec polarité inversée doivent avoir un plus grand diamètre, sinon elles fondent car la chaleur transférée est beaucoup plus grande.

Figure 2.30 Choix des électrodes en fonction du type de courant

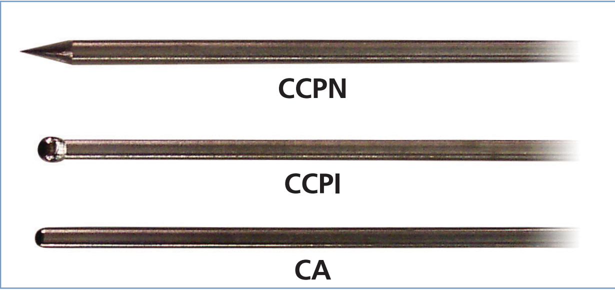
CCPN (CCEN)	AC ou CCPI (CCEP)
1. Thorié 2 % (EWTh-2)	1. Zirconium (EWZr-1)
2. Cérium (EWCe-2)	2. Pur (EWP)
3. Thorié 1 % (EWTh)	3. Cérium (EWCe-2)
4. Lanthane (EWLa-1)	4. Lanthane (EWLa-1)
5. Pur (EWP)	

Figure 2.31 Intensité du courant en fonction du diamètre des électrodes (courant donné en ampères)

Diamètre		CCPN (CCEN)	CCPI (CCEP)	CA
po	mm			
0,01	0,25	jusqu'à 15	–	jusqu'à 15
0,02	0,50	5 à 20		5 à 20
0,04	1,00	15 à 80		10 à 60
0,06	1,6	70 à 150	10 à 20	50 à 100
0,09	2,4	150 à 250	15 à 30	60 à 160
0,125	3,2	250 à 400	25 à 40	100 à 210
0,16	4,0	400 à 500	40 à 55	160 à 275
0,19	4,8	500 à 750	55 à 80	190 à 350
0,25	6,4	750 à 1100	80 à 125	250 à 450

Les électrodes doivent être préparées convenablement ; de plus, la forme de la pointe dépend elle aussi du courant utilisé (figure 2.32).

Figure 2.32 Préparation du bout de l'électrode selon le type de courant



◆ *Baguette d'apport*

La baguette d'apport est utilisée pour le soudage de pièces épaisses. Pour les tôles minces, on peut souder un joint à bords relevés directement. On choisit généralement une baguette d'apport dont la composition se rapproche le plus de celle du métal de base. Le diamètre de la baguette augmente avec l'épaisseur des pièces à souder (figure 2.33).

Figure 2.33 Sélection du diamètre des baguettes d'apport en fonction de l'épaisseur du métal à souder

Diamètre de la baguette (mm)	Épaisseur du métal à souder (mm)
1,6	0,5 à 2,4
2,4	2,4 à 4,8
3,2	4,8 à 8
4,8	8 à 12,7
6,4	12,7 ou plus

◆ *Gaz de protection*

Le gaz de protection sert essentiellement à protéger le bain de fusion et l'électrode de tungstène contre l'oxydation. Les principales caractéristiques des gaz de protection couramment utilisés avec ce type de procédé sont présentées à la figure 2.34.

Figure 2.34 Principales caractéristiques des gaz de protection

Gaz	Principales caractéristiques
Hélium	– Haute tension d'arc (donc plus de chaleur, ce qui permet le soudage de pièces plus épaisses) – ZTA plus petite (donc moins de déformations) – Le volume de gaz doit être élevé. – Très sensible aux courants d'air – Déconseillé avec du courant alternatif à cause de la difficulté d'amorçage de l'arc
Argon	– Basse tension d'arc (soude surtout des pièces minces, soit moins de 6 mm) – Bonne action nettoyante (notamment pour les métaux qui s'oxydent en surface comme l'aluminium) – Amorçage de l'arc facile – Arc stable – Le volume de gaz est restreint. – Déconseillé pour le soudage automatique (à cause de la grande vitesse de soudage)

On utilise une purge pour obtenir une protection gazeuse supplémentaire au joint à souder, afin d'éviter l'oxydation du métal. La purge s'effectue en utilisant l'argon ou un autre gaz inerte pour souffler l'air hors du joint. On peut aussi placer la purge à l'envers du joint à souder.

Le tableau de la figure 2.35 donne un aperçu des électrodes et des gaz de protection recommandés pour le soudage de différents métaux avec ce procédé.

Figure 2.35 Électrodes de tungstène et gaz de protection recommandés pour le soudage de différents métaux

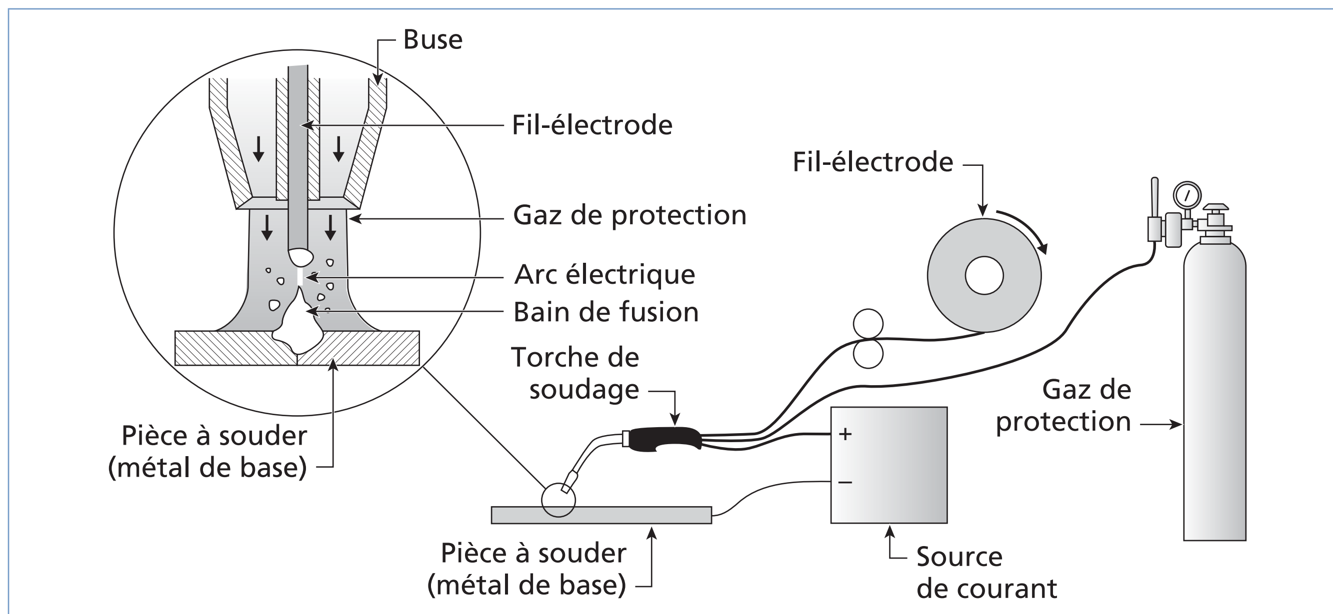
Type de métal	Épaisseur	Type de courant	Électrode	Gaz de protection
Aluminium	Toutes Épais seulement Mince seulement	Alternatif (CA) CCPN CCPI	Pure ou au zirconium Thoriée Thoriée ou au zirconium	Argon ou argon-hélium Argon ou argon-hélium Argon
Cuivre, alliages de cuivre	Toutes Mince seulement	CCPN Alternatif (CA)	Thoriée Pure ou au zirconium	Argon ou argon-hélium Argon
Alliages de magnésium	Toutes Mince seulement	Alternatif (CA) CCPI	Pure ou au zirconium Thoriée ou au zirconium	Argon Argon
Nickel, alliages de nickel	Toutes	CCPN	Thoriée	Argon
Acier doux, acier faiblement allié	Toutes Mince seulement	CCPN Alternatif (CA)	Thoriée Pure ou au zirconium	Argon ou argon-hélium Argon
Acier inoxydable	Toutes Mince seulement	CCPN Alternatif (CA)	Thoriée Pure ou au zirconium	Argon ou argon-hélium Argon ou argon-hydrogène
Titane	Toutes	CCPN	Thoriée	Argon

GMAW (Gas Metal Arc Welding)

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (figure 2.36).

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Comme pour le GTAW, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection.

Figure 2.36 Principe de fonctionnement du procédé GMAW



Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Il peut être poussé ou tiré. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable.

On distingue deux catégories de GMAW, en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

1. Le procédé MIG (*Metal Inert Gas*) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium) ;
2. Le procédé MAG (*Metal Active Gas*) qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif.

◆ *Avantages et inconvénients*

Le procédé de soudage GMAW soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium (où il tend à remplacer de plus en plus le GTAW) et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés.

Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier. La pénétration obtenue peut être profonde; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible.

Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables.



Pour les métaux mous (ex. l'aluminium), il est préférable d'utiliser un dévidoir poussé-tiré.

Les caractéristiques du procédé de soudure GMAW dépendent des modes de transfert utilisés (figure 2.37).

Figure 2.37 Caractéristiques des modes de transfert du GMAW

	Court-circuit	Globulaire	Pulvérisation axiale	Pulsé
Métaux à souder	– Aciers – Aciers inoxydables – Aluminium	– Aciers – Aciers inoxydables	– Aciers – Aciers inoxydables – Aluminium	– Aciers – Aciers inoxydables – Aluminium
Intensité (A)	– 50 à 200	– Jusqu'à 600	– Jusqu'à 600	– 30 à 600
Épaisseurs	– 1 mm et plus	– 3 mm et plus	– 3 mm et plus (acier) – 6 mm et plus (aluminium)	– Entre 0,8 et 3 mm (aluminium) – 0,8 mm et plus (acier)
Gaz	– CO_2 – Argon – Hélium – Mélanges de gaz	– CO_2 – Argon – Hélium – Mélanges de gaz	– Mélanges de gaz – Atmosphère riche en argon (plus de 80 %)	– Mélanges de gaz – Atmosphère riche en argon

Données tirées de la documentation BOC gaz



Figure 2.37 Caractéristiques des modes de transfert du GMAW (suite)



	Court-circuit	Globulaire	Pulvérisation axiale	Pulsé
Positions de soudage	– Toutes positions	– Toutes positions (petit diamètre de fil) ou en fonction du diamètre du fil utilisé	– Toutes positions (petit diamètre de fil) (aluminium) ou en fonction du diamètre du fil utilisé	– Toutes positions
Apparence de la soudure	– Surface lisse à rugueuse	– Surface relativement lisse, avec des éclaboussures	– Surface lisse, sans éclaboussures	– Surface lisse, sans éclaboussures
Principaux avantages	– Métal mince – Toutes positions	– Pénétration profonde – Vitesse d'exécution – Prix modique	– Vitesse d'exécution – Sans éclaboussures – Pénétration profonde – Arc doux	– Métal mince – Toutes positions – Faible apport de chaleur

Données tirées de la documentation BOC gaz

◆ *Applications*

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé. Les applications spécifiques dépendent généralement du mode de transfert choisi (figure 2.38).

Figure 2.38 Applications du procédé GMAW en fonction du mode de transfert utilisé

Mode de transfert	Applications
Par court-circuit	– Soudage de tuyauterie – Soudage en position des aciers – Passe de fond sur plaques épaisses
Transfert globulaire	– Soudage avec CO_2 comme gaz de protection pour les aciers (le CO_2 est plus économique) – Grosses pièces épaisses comme, par exemple, des dents de pelles mécaniques
Par pulvérisation axiale	– Soudage avec au moins 85 % d'argon comme gaz de protection – Soudage rapide à pénétration profonde – Soudage de tôles épaisses
GMAW pulsé	– Mode le plus polyvalent, peut souder à peu près tout.
Transfert à froid	– Plaques minces d'acier – Soudage de plaques minces d'acier avec de l'aluminium

◆ *Soudeuse et type de courant utilisés*

Ce type de procédé s'emploie le plus souvent avec une soudeuse à potentiel constant, qui convient bien à un fil-électrode dévidé à vitesse constante. Le courant continu avec polarité inversée est favorisé, notamment parce qu'il produit une meilleure pénétration.

L'utilisation d'une soudeuse à courant constant exige que l'on dispose d'un dévidoir à vitesse variable asservie par la tension de l'arc.

◆ *Fil-électrode*

On choisit un fil-électrode de composition chimique similaire à celle du métal à souder, particulièrement pour les aciers alliés, les aciers inoxydables et les métaux non ferreux. Pour le soudage de l'acier, certains fils-électrodes contiennent plus de désoxydants et permettent de souder des aciers difficilement soudables autrement, incluant des pièces recouvertes d'une certaine quantité de saleté ou de rouille.

Les facteurs à considérer pour le choix du fil-électrode pour un acier sont :

1. l'état de la surface des pièces ;
2. le type d'acier (calmé ou effervescent) ;
3. le gaz de protection utilisé ;
4. le degré de résilience requis.

– *Longueur terminale*

La longueur terminale représente la longueur du fil-électrode qui sort du tube contact (figure 2.39).

Cette longueur de fil représente une résistance qui a des effets notables sur l'intensité du courant, la pénétration et le taux de dépôt (figure 2.40). En général, on ajuste la longueur terminale en fonction du diamètre du fil-électrode.

Figure 2.39 Longueur terminale

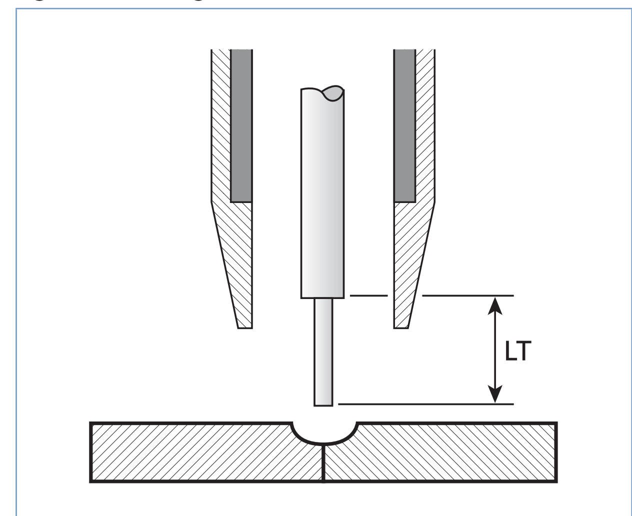
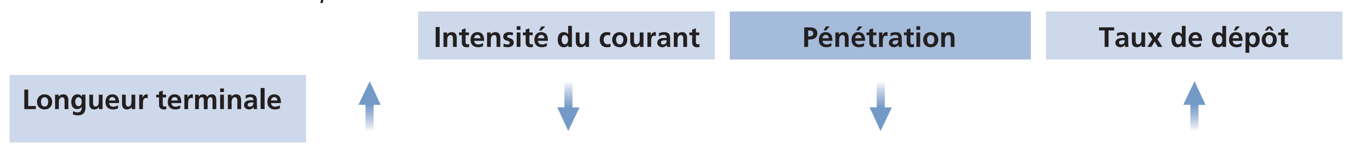


Figure 2.40 Relation entre la longueur terminale et l'intensité du courant (tension et vitesse constantes), la pénétration et le taux de dépôt



◆ *Gaz de protection*

Selon la nature du métal à souder, on peut utiliser le procédé MIG avec un gaz inerte, soit généralement l'argon (Ar), l'hélium (He) ou un mélange des deux (Ar-He).

Quant au procédé MAG, il emploie des gaz actifs, tels que le gaz carbonique (CO_2) ou encore un mélange d'argon associé au gaz carbonique (Ar-CO_2), à l'oxygène (Ar-O_2) ou des mélanges faits de trois gaz tels que hélium-argon-gaz carbonique (He-Ar-CO_2) ou argon-gaz carbonique-hydrogène (Ar-CO_2-H). Le choix des gaz dépend du métal à souder (figure 2.41).

Figure 2.41 Gaz de protection en fonction du métal à souder pour le procédé GMAW

Gaz	Applications
Argon (Ar)	Soudage de la majorité des métaux non ferreux
Hélium (He)	Soudage de l'aluminium et du cuivre
CO_2	Soudage des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés
Ar (75 %) et He (25 %) Ar (50 %) et He (50 %) Ar (25 %) et He (75 %)	Soudage de l'aluminium, du cuivre et de leurs alliages
Ar (98 %) et O_2 (2 %)	Soudage des aciers alliés et inoxydables
Ar (90 %) et CO_2 (10 %) Ar (85 %) et CO_2 (15 %) Ar (75 %) et CO_2 (25 %) Ar (98 %) et O_2 (2 %) Ar (95 %) et O_2 (5 %)	Soudage de la plupart des aciers Pour soudage en mode pulsé
He (90 %), Ar (7,5 %) et CO_2 (2,5 %) Ar (98 %) et O_2 (2 %) Ar (96,5 %) et CO_2 (2,5 %) et H_2 (1 %)	Soudage des aciers inoxydables

La figure 2.42 illustre les effets des gaz de protection sur le dépôt du métal d'apport tandis que la figure 2.43 montre l'apparence du cordon, sur de l'acier, en fonction de différents gaz ou mélanges gazeux utilisés lors du procédé GMAW.

Figure 2.42 Influence des gaz de protection

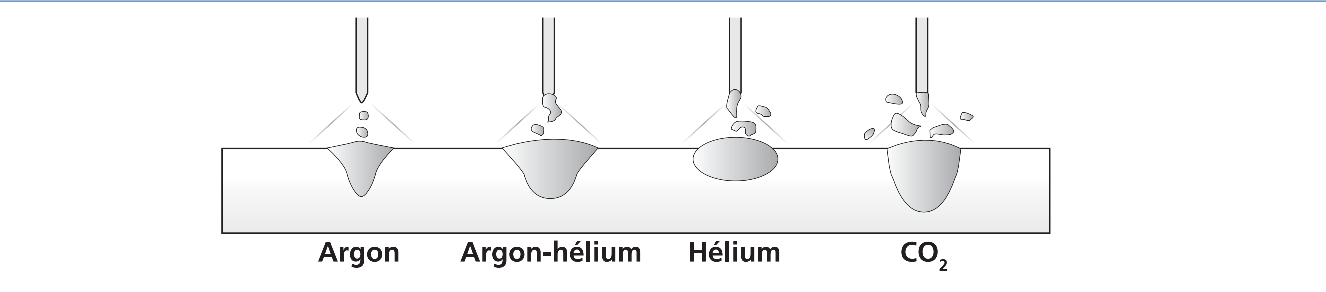
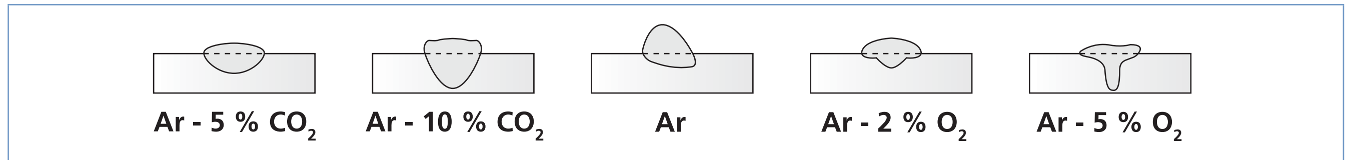


Figure 2.43 Cordons obtenus avec différents gaz de protection (en transfert pulsé sur de l'acier)



Le tableau de la figure 2.44 présente les types de gaz, les modes de transfert et les applications possibles pour différents métaux habituellement soudés avec ce même procédé.

Figure 2.44 Réglage des paramètres avec le procédé GMAW

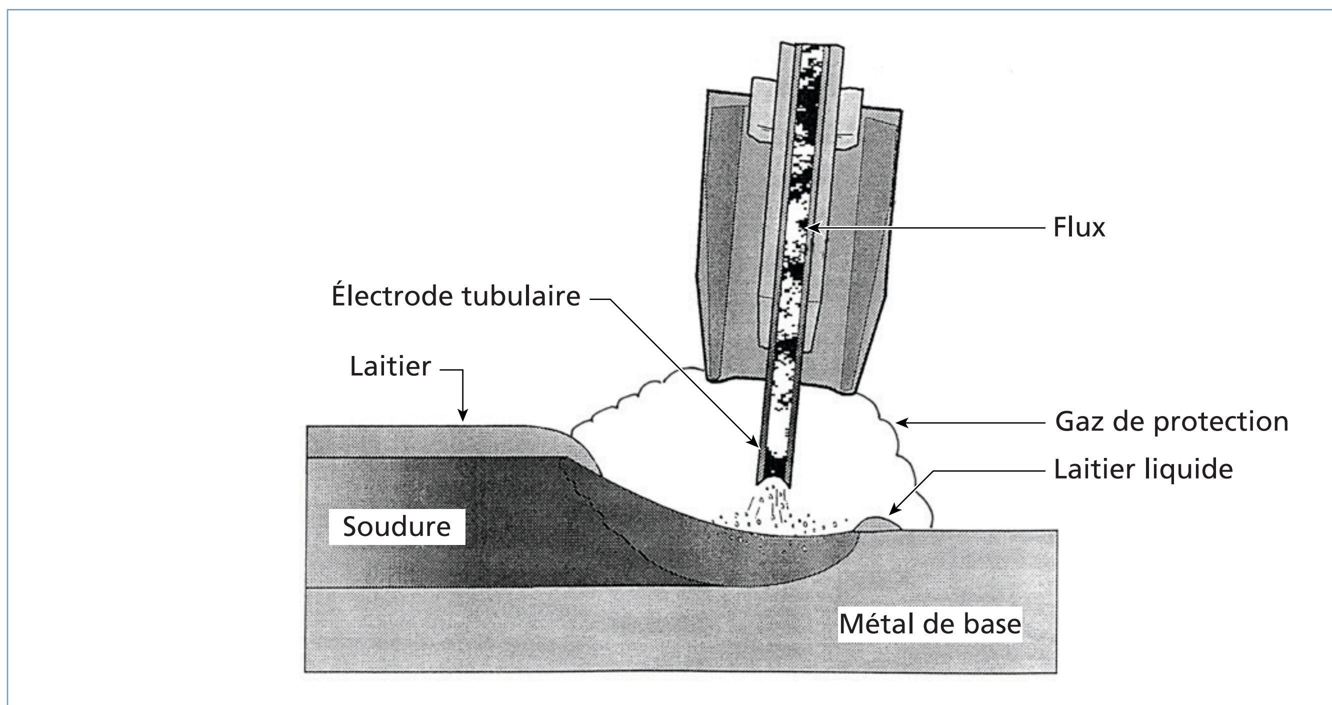
Dans le cas d'une source à potentiel constant et d'un déridoir à vitesse constante				
Métaux	**Applications**	**Transfert**	**Gaz**	**Réglage des paramètres**
Aciers	– Plaques < 3,5 mm Toutes positions – Plaques > 3,5 mm Verticale et au plafond	Court-circuit	CO_2 Ar + CO_2 (15 à 25 %) Ar + CO_2 + O_2	– Vitesse de faible à moyenne Tension faible (< 22 V environ) – Vitesse moyenne Tension faible (< 22 V environ)
	– Plaques > 3,5 mm À plat et horizontale	Pulvérisation axiale	Ar + O_2 (2 à 5 %) Ar + CO_2 (10 à 20 %) Ar + CO_2 + O_2	– Vitesse > courant transition Tension élevée (> 25 V environ)
Aciers inoxydables	– Plaques < 3,5 mm Toutes positions – Plaques > 3,5 mm Verticale et au plafond	Court-circuit	He + Ar + CO_2 Ar + CO_2 + H_2	– Vitesse de faible à moyenne Tension faible (< 24 V environ) – Vitesse moyenne Tension faible (< 24 V environ)
	– Plaques > 3,5 mm À plat et horizontale	Pulvérisation axiale	Ar + O_2 (1 à 2 %) Ar + CO_2 + H_2	– Vitesse > courant transition Tension élevée (> 25 V environ)
	– Plaques > 2 mm Toutes positions	Globulaire et pulvérisation axiale	Ar Ar + He (jusqu'à 25 %) Ar + CO_2 + H_2	– Vitesse de faible à élevée Tension de moyenne à élevée
Aluminium	– Plaques > 10 mm environ	Globulaire	He	– Vitesse élevée Tension élevée

FCAW (Flux Cored Arc Welding) et MCAW (Metal Cored Arc Welding)

Le soudage avec fil fourré utilise un fil-électrode fourré qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport, procurant un flux de protection supplémentaire (FCAW).

Dans le cas du MCAW, c'est une poudre métallique qui remplit le fil-électrode. Le principe de base est le même que pour le GMAW, seul le fil-électrode diffère (figure 2.45).

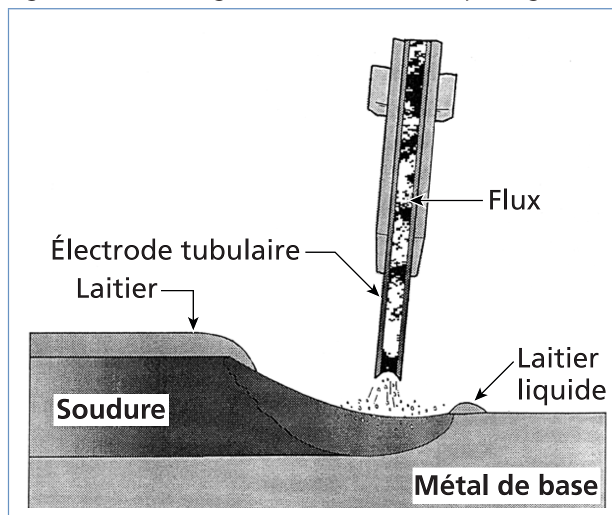
Figure 2.45 Soudage avec fil fourré et gaz de protection



La plupart du temps, ces deux procédés utilisent un gaz de protection, à l'exception de certains cas, lors de l'utilisation du procédé FCAW avec fil autoprotégé (figure 2.46).

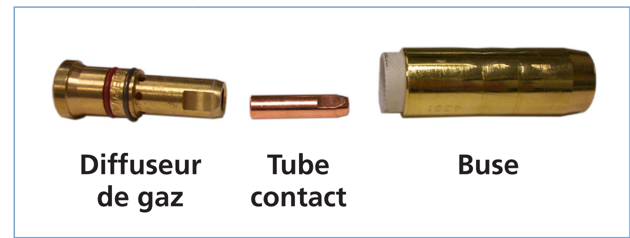
Il existe différents types de torches associées à ces procédés. On choisit généralement la torche en fonction de la soudeuse utilisée (par exemple, 300 A ou 450 A). Au-delà de 500 A, on doit utiliser une torche refroidie à l'air.

Figure 2.46 Soudage avec fil fourré autoprotégé



On trouve aussi des torches pour le soudage avec fil autoprotégé et d'autres munies d'un dispositif d'aspiration des fumées. Les pièces de torche qui s'usent le plus rapidement sont le diffuseur de gaz, le tube contact et la buse (figure 2.47). Le procédé à fil autoprotégé n'utilise pas de gaz de protection ; donc, il ne requiert pas de buse.

Figure 2.47 Pièces de la torche de soudage à remplacer fréquemment



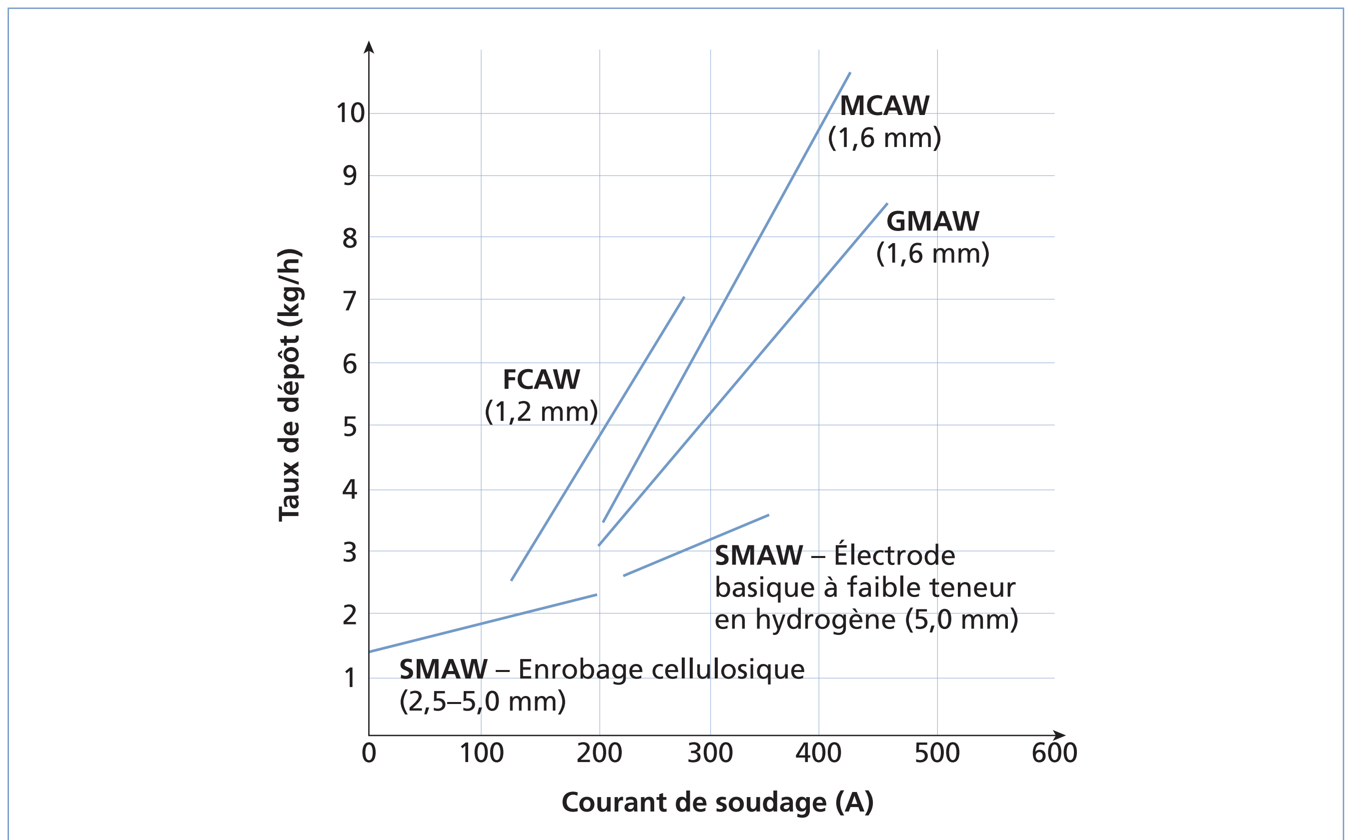


Les dévidoirs à fil tiré, qui sont munis d'une bobine plus petite, ne conviennent pas au procédé FCAW, parce que le taux de production est trop élevé.

◆ *Avantages et inconvénients*

Ces procédés de soudage connaissent un essor certain, dû notamment à leur taux de dépôt supérieur aux autres procédés en fonction de l'intensité de courant utilisé (figure 2.48).

Figure 2.48 Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents procédés



On emploie les procédés FCAW et MCAW pour le soudage de l'acier doux ou faiblement allié ainsi que pour l'acier inoxydable. Ces procédés procurent une pénétration profonde et sont appropriés pour le soudage de fortes épaisseurs de métal (variant le plus souvent entre 5 et 50 mm).

Ils sont idéals pour réaliser des soudures d'angle en position à plat et en T horizontal à grande vitesse, ainsi que pour le remplissage de chanfreins profonds.

Plus encore que le GMAW, ces procédés tolèrent une certaine quantité de saleté ou de rouille sur le métal. Le laitier obtenu avec le procédé FCAW se détache facilement et est inexistant avec le procédé MCAW. À l'exception de quelques îlots de silicate un peu plus nombreux, ce dernier est similaire au procédé GMAW.



Attention !
Lors du refroidissement du cordon de soudure, les îlots de silicate peuvent éclater et causer des brûlures.

Par contre, l'équipement à utiliser est complexe et le soudage doit se faire à l'abri de l'air (sauf si on utilise des fils autoprotégés). Le procédé FCAW avec fil autoprotégé présente des avantages particuliers par rapport au procédé sous protection gazeuse (figure 2.49).

Figure 2.49 Avantages des procédés FCAW avec fil autoprotégé et sous protection gazeuse

Procédés FCAW	Avantages
Avec fil autoprotégé	– Moins sensible aux effets du vent ou des courants d'air – Nécessite moins d'équipements. – Peut utiliser le même équipement que le procédé SMAW si muni d'un dévidoir à vitesse variable asservi à la tension de l'arc.
Sous protection gazeuse	– Meilleure qualité de soudure – Pénétration plus profonde – Temps de nettoyage moindre – Valeur de résilience plus élevée – Rendement légèrement supérieur



Lorsqu'on travaille avec des fils autoprotégés, il faut garder une longueur terminale supérieure à celle utilisée avec une protection gazeuse. Celle-ci assure un préchauffage du fil et aide à sa fusion ; il en résulte un taux de dépôt plus élevé. Il existe des tubes contacts, dont une partie de la paroi interne est isolée, qui permettent encore d'accroître la longueur terminale.

◆ *Applications*

Ces procédés sont particulièrement utilisés dans l'industrie de la fabrication de ponts, de réservoirs, de turbines, de matériel agricole et de châssis de camions, de même que dans la construction navale, la chaudronnerie-tuyauterie, les travaux d'entretien, le rechargement, etc.

Le procédé avec fil autoprotégé peut notamment être utilisé dans des endroits plus aérés et convient particulièrement à la soudure de joints mal ajustés, en réduisant les risques d'effondrement.

◆ *Soudeuse et type de courant utilisés*

Comme le procédé GMAW, ces procédés s'emploient généralement avec une soudeuse à potentiel constant et un courant continu avec polarité inversée. La vitesse de dévidage du fil doit être ajustée en fonction de la tension sélectionnée. L'utilisation d'une soudeuse à courant constant exige que l'on dispose d'un dévidoir à vitesse variable, asservie à la tension de l'arc.

L'intensité du courant influence la grosseur des gouttes de métal d'apport déposées : plus elle est élevée, plus les gouttes sont petites.

◆ *Fil-électrode*

Il existe une grande variété de fils-électrodes fourrés avec flux, parce que tant la composition du fil à l'extérieur que celle du flux au centre de celui-ci peuvent varier.

Les critères de choix d'un fil-électrode dépendent principalement des facteurs suivants :
- la composition du métal de base ;
- le type de joint et les dimensions de la soudure ;
- l'état de la surface du métal de base ;
- l'utilisation intérieure ou extérieure ;
- le nombre de passes (une ou multipasse) ;
- la position de soudage désirée ;
- la résistance à la traction ;
- le type de gaz de protection utilisé.

Les fils-électrodes à centre de poudre métallique, par exemple, conviennent bien au soudage à plat ou en T horizontal. Leur centre est composé de poudre de fer auquel s'ajoute d'autres éléments (notamment du carbone, du manganèse, du silicium, du soufre et du phosphore), mais en petite quantité. De cette façon, lors du soudage de l'acier, le fer s'intègre à la soudure. Ces fils-électrodes sont conçus pour des soudures à vitesse d'avance et à taux de dépôt élevés.

Les fils-électrodes fourrés avec flux, à centre de poudre métallique et autoprotégés, sont régis par la norme canadienne CSA W48-01 et la norme américaine AWS A.5.20 (avec flux et autoprotégés), ou A.5.18 (à centre de poudre métallique).

Les fils-électrodes avec flux permettent le soudage dans toutes les positions. Il existe différents types de flux qui varient en fonction du résultat désiré. Le type de flux influence la forme des gouttes de métal d'apport déposées. Elles sont plus globulaires avec un flux basique (transfert globulaire), mais peuvent atteindre une qualité de pulvérisation avec un flux rutile (qui favorise un transfert plus doux).

Les fils autoprotégés de types basiques sont particulièrement utilisés pour le rechargement et peuvent servir aussi sur les chantiers.

◆ *Longueur terminale*

Comme pour le GMAW, la longueur terminale du fil-électrode affecte plusieurs paramètres de soudage. En général, on ajuste la longueur terminale des fils fourrés en fonction de leur diamètre (figure 2.50).

Figure 2.50 Longueurs terminales recommandées pour différents fils fourrés

Type de fil fourré	Diamètre du fil	Longueur terminale (mm)
Avec protection gazeuse	0,8-0,9	8 à 12
	1,2	10 à 15
	1,6	12 à 18
	2,0-2,4	15 à 25
Autoprotégé	0,8-0,9	10 à 12
	1,2	12 à 15
	1,6	15 à 35
	2,0-2,4	35 à 75
	2,8	40 à 100

Protection du bain de fusion

Le gaz protecteur le plus couramment utilisé avec le procédé FCAW est le CO_2. Il est utilisé seul ou mélangé avec de l'argon (25 % CO_2, 75 % Ar). Si le flux ou le métal d'apport contient du manganèse ou du silicium, l'utilisation de CO_2 seul est préférable, car elle permet d'expulser le manganèse en fumée, évitant ainsi les défauts de soudage. Le CO_2 est en effet plus oxydant qu'un mélange de gaz.

Certains fils sont développés spécialement pour être utilisés avec un mélange de gaz incluant l'argon ; la lettre « M » est alors présente dans la codification du fil-électrode.

Avec le procédé MCAW, on utilise des mélanges à taux d'argon très élevé. Ce gaz peut atteindre 98 % de la composition du mélange.



Exercice 2.5

1. Parmi les avantages des différents procédés de soudage énumérés ci-dessous, lesquels s'appliquent au procédé :

   a) SMAW ? ____________________

   b) GTAW ? ____________________

   c) GMAW ? ____________________

   d) MCAW ? ____________________

   e) FCAW avec fil autoprotégé ? ____________________

1. Soudage dans toutes les positions	9. Pas de projections
2. Taux de dépôt très élevé	10. Idéal pour souder les plaques épaisses
3. Équipement peu coûteux	11. Soude la plupart des métaux.
4. Meilleure qualité de soudure	12. Équipement simple
5. Ne nécessite pas de gaz de protection.	13. Pas de laitier à nettoyer
6. Soudage rapide	14. Peut être utilisé sur un chantier.
7. Peu de déformations	15. Plus haut taux de dépôt
8. Permet de souder de longues distances sans reprise.	

2. Dans la figure 2.51, associez les applications suivantes au procédé de soudage correspondant.

   Note : Un ou plusieurs procédés peuvent être associés à une même application.

Figure 2.51

Applications			Procédé
a)	Construction aéronautique		1. SMAW
b)	Fabrication de grosses pièces (ponts, réservoirs, turbines, etc.)		2. GTAW
c)	Réparations		3. GMAW
d)	Procédé extrêmement répandu dans tous les domaines de fabrication		4. FCAW
e)	Fabrication de petites pièces		5. MCAW
f)	Soudage à l'extérieur		

3. Dans la figure 2.52, déterminez quel type de polarité produit la plus grande pénétration pour chacun des procédés de soudage suivants.

Figure 2.52

	CCPN	CCPI
a) SMAW	☐	☐
b) GTAW	☐	☐
c) GMAW	☐	☐
d) FCAW	☐	☐

4. Quel est l'avantage d'utiliser du courant avec polarité inversée avec le procédé de soudage GTAW ?

   a) Il augmente la vitesse de soudage. ☐
   b) Il réduit l'intensité de courant nécessaire. ☐
   c) Il a une action nettoyante. ☐
   d) Il offre une plus grande pénétration. ☐

5. Laquelle des propriétés suivantes ne constitue pas une propriété des enrobages d'électrodes ?

   a) Servir de liant. ☐
   b) Produire des gaz protecteurs. ☐
   c) Stabiliser l'arc. ☐
   d) Durcir l'acier. ☐

6. Lors du soudage avec le procédé GTAW, nommez un facteur qui affecte le choix du diamètre des baguettes d'apport.

   ____

7. Quels sont les facteurs qui affectent le choix du fil-électrode ?

   ____

   ____

8. Dans la figure 2.53, associez le gaz ou le mélange de gaz de protection au type de procédé GMAW correspondant.

Figure 2.53

Gaz ou mélange de gaz de protection		Procédé
a) Argon-gaz carbonique-hydrogène	☐	1. MIG
b) Hélium-argon	☐	2. MAG
c) Argon	☐	
d) Argon-oxygène	☐	

9. Dans la figure 2.54, associez le mode de transfert correspondant à son application spécifique lors du soudage avec le procédé GMAW.

Figure 2.54

Applications		Mode de transfert
a) Soudage de tôles épaisses	☐	1. Court-circuit
b) Soudage en position des aciers	☐	2. Transfert globulaire
c) Mode de transfert le plus polyvalent, s'adapte à presque tous les types de travaux.	☐	3. Pulvérisation axiale
d) Soudage à grande pénétration avec CO_2 comme gaz de protection	☐	4. Pulsé

10. Dans la figure 2.55, déterminez si les énoncés suivants sont vrais ou faux.

Figure 2.55

	Vrai	Faux
a. La longueur terminale augmente avec le diamètre du fil-électrode.	☐	☐
b. Lorsque la longueur terminale augmente, la pénétration augmente également.	☐	☐
c. L'intensité du courant diminue avec la longueur terminale.	☐	☐
d. Lorsque la longueur terminale augmente, le taux de dépôt augmente également.	☐	☐

Paramètres de soudage

Pour chaque type de procédé de soudage, de nombreux paramètres déterminent les caractéristiques des soudures (figure 2.56).

Figure 2.56 Paramètres de soudage en fonction du procédé utilisé

Procédé / Paramètres	Tension	Type de courant	Intensité du courant	Vitesse d'avance	Angle de la torche	Longueur d'arc	Longueur terminale	Vitesse de dévidage	Diamètre du fil	Diamètre de l'électrode	Type de gaz	Type de flux
SMAW	☐	✓	✓	✓	☐	✓	☐	☐	☐	✓	☐	✓
GTAW	☐	✓	✓	✓	✓	✓	☐	☐	☐	✓	✓	☐
GMAW	✓	☐	✓	✓	✓	☐	✓	✓	✓	☐	✓	☐
FCAW	✓	✓	✓	✓	✓	☐	✓	✓	✓	☐	✓	✓
MCAW	✓	☐	✓	✓	✓	☐	✓	✓	✓	☐	✓	☐

Ces paramètres influencent, entre autres, la largeur, la pénétration et l'épaisseur du cordon de soudure, comme le montre la figure 2.57.

Les effets des différents paramètres de soudage affectent aussi la qualité de la soudure. Ceux-ci seront exposés plus en détail aux chapitres 5 et 6 de ce guide.

Figure 2.57 Paramètres de soudage en fonction du procédé utilisé

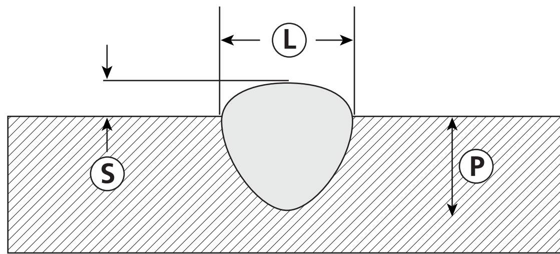


Tableau pour SMAW

Paramètres		(P)	(L)	(S)
Intensité du courant	↑	↑	↑	↑
Vitesse d'avance	↑	↓	↓	↓
CCPI	oui	↑	↓	✗
CCPN	oui	↓	↑	✗

Tableau pour GMAW, FCAW et MCAW

Paramètres		(P)	(L)	(S)
Tension	↑	↑	↑	↓
Intensité du courant	↑	↑	↑	↑
Vitesse d’avance	↑	↓	↓	↓
Longueur terminale	↑	↓	↑	↓
Soudage en poussant	↑	↓	↑	↑
Soudage en tirant	↑	↑	↓	↑

Tableau pour GTAW

Paramètres		(P)	(L)	(S)
Intensité du courant	↑	↑	↑	↑
CCPI	oui	↓	↑	✗
CCPN	oui	↑	↓	✗
CA	oui	=	=	✗
Vitesse d'avance	↑	↓	↓	↓
Longueur de l’arc	↑	↓	↑	↓



Exercice 2.6

1. Parmi les paramètres de soudage ci-dessous, lequels s'appliquent au procédé :
   a) SMAW ? ____________________
   b) GTAW ? ____________________
   c) GMAW ? ____________________
   d) MCAW ? ____________________

1. Tension	7. Longueur terminale
2. Intensité du courant	8. Vitesse de dévidage
3. Type de courant	9. Diamètre de l'électrode
4. Vitesse d'avance	10. Diamètre du fil
5. Angle de la torche	11. Type de flux
6. Longueur d'arc	12. Type de gaz

2. Dans la figure 2.58, associez les variations de paramètres avec les résultats obtenus lors du soudage avec le procédé SMAW.

Figure 2.58

Variations de paramètres		Résultats
a) Augmentation de l'intensité du courant		1. Augmentation de la pénétration
b) Augmentation de la vitesse d'avance		2. Cordon plus large
c) Utilisation du courant à polarité normale		3. Cordon plus épais
d) Utilisation du courant à polarité inversée		4. Cordon moins épais

3. Dans la figure 2.59, associez les variations de paramètres avec les résultats obtenus lors du soudage avec le procédé GTAW.

Figure 2.59

Variations de paramètres		Résultats
a) Diminution de l'intensité du courant		1. Augmentation de la pénétration
b) Diminution de la vitesse d'avance		2. Cordon plus large
c) Utilisation du courant à polarité normale		3. Cordon plus épais
d) Utilisation du courant à polarité inversée		4. Cordon moins épais
e) Augmentation de la longueur d'arc		

4. Dans la figure 2.60, associez les variations de paramètres avec les résultats obtenus lors du soudage avec les procédés semi-automatiques GMAW, FCAW et MCAW.

Figure 2.60

Variations de paramètres		Résultats
a) Augmentation de l'intensité du courant		1. Augmentation de la pénétration
b) Diminution de tension		2. Cordon plus large
c) Augmentation de la vitesse d'avance		3. Cordon plus épais
d) Diminution de la longueur terminale		4. Cordon moins épais
e) Soudage en poussant		
f) Soudage en tirant		

Résumé

- Le SMAW est le procédé de soudure à l'arc qui procure la plus grande liberté d'exécution, car il peut être utilisé pratiquement n'importe où et dans n'importe quelle condition. L'équipement est relativement simple, car la protection du bain de fusion est fournie par l'enrobage de l'électrode.
- Il peut servir à la fabrication d'items spécialisés (par exemple, en tuyauterie), pour le soudage de l'acier inoxydable ou pour la réparation de pièces. Cependant, le SMAW est surtout utilisé sur le chantier ou pour la réparation plutôt qu'en atelier.
- Le procédé GTAW permet d'obtenir des soudures précises, un dépôt dense et est particulièrement approprié pour le soudage des métaux non ferreux ou à faible soudabilité.

– Quant au procédé GMAW, il est très répandu, car selon le mode de transfert utilisé, il peut servir à souder tous les types de métal et toutes les épaisseurs de matériau. Le choix des fils-électrodes et des gaz de protection dépend du métal de base et du mode de transfert utilisés.
– Enfin, les procédés semi-automatiques à fils fourrés ou à fils à centre de poudre métallique sont aussi très répandus, notamment à cause de leur taux de dépôt particulièrement élevé. Ils permettent le soudage dans toutes les positions. L'utilisation de fils fourrés autoprotégés permet aussi l'utilisation du procédé dans une grande variété de conditions.
– Les paramètres de soudage sont souvent interreliés et il existe une variété presque infinie de combinaisons possibles. Le soudeur doit toujours s'assurer de bien connaître son procédé et de respecter les paramètres de soudage recommandés afin de réaliser une soudure sans faille.

Notes

Chapitre 3 NOTIONS DE MATHÉMATIQUE ET DE MÉTROLOGIE

Lors de la préparation d'une pièce et de la vérification de sa conformité, on doit savoir prendre les mesures d'une façon appropriée afin d'éviter les mauvaises surprises lors du soudage. La science générale des mesures s'appelle la métrologie et elle fait l'objet de ce chapitre. On y présente les systèmes de mesures, diverses notions de base en mathématiques ainsi que les instruments de mesure couramment employés en soudage. Les tolérances des mesures sont abordées en fin de chapitre.

Systèmes de mesures

On retrouve deux systèmes de mesures utilisés en Amérique du Nord. Le système international d'unités (SI), qui est en vigueur au Canada depuis le début des années 70, et le système impérial, qui constitue le système officiel aux États-Unis.

La figure 3.1 présente les conversions des unités les plus souvent utilisées en soudage, d'un système à l'autre.

Figure 3.1 Équivalences des unités les plus utilisées entre les deux systèmes de mesures

	SI → système impérial		Système impérial → SI	
	Unité	**Équivalences**	**Unité**	**Équivalences**
Longueur	1 mètre (m)	3,2808 pi 39,3696 po	1 pied (pi)	0,3048 m 30,48 cm 304,8 mm
	1 centimètre (cm)	0,0328 pi 0,3937 po	1 pouce (po)	2,54 cm 25,4 mm
	1 millimètre (mm)	0,0394 po 39,4 millième de pouce	1 millième de pouce (mil)	0,025 mm 0,929 m^2
Poids	1 kilogramme (kg)	2,2046 lb	1 livre (lb)	0,4536 kg

La conversion des températures d'un système à l'autre se fait à l'aide de formules. Ainsi, pour convertir en degrés Fahrenheit une température en degrés Celsius, on procède comme suit :

$$^\circ C = \frac{5}{9}(^\circ F - 32)$$

Inversement, pour convertir en degrés Celsius une température en degrés Fahrenheit, on utilise la formule suivante :

$$^\circ F = (\frac{9}{5} \times {}^\circ C) + 32$$

Pour convertir une mesure, on multiplie par la valeur de conversion.

Exemple

Pour convertir 8 mm en po, on trouve d'abord dans le tableau que 1 mm = 0,0394 po.

Donc, 8 mm = 8 × 0,0394 po = 0,3152 po.

Pour les températures, on applique les formules.

Exemple

On veut convertir 5 500 °C en °F.

$$^\circ F = (\frac{9}{5} \times {}^\circ C) + 32$$

Donc, $x^\circ F = (\frac{9}{5} \times 5500^\circ C) + 32 = 9932^\circ F$

5 500 °C = 9 932 °F



Exercice 3.1

1. Calculez et cochez la valeur appropriée en pouces ou en millimètres.

   a) 3 mm :

   67,3 mil ☐ 97 mil ☐ 105,4 mil ☐ 118,2 mil ☐

   b) 0,5 mm :

   15,3 mil ☐ 19,7 mil ☐ 23,0 mil ☐ 24,9 mil ☐

   c) 3 po :

   43,0 mm ☐ 59,9 mm ☐ 62,6 mm ☐ 76,2 mm ☐

   d) 0,8 po :

   18,95 mm ☐ 20,32 mm ☐ 32,50 mm ☐ 34,87 mm ☐

2. Calculez et cochez la valeur des températures suivantes en °F ou en °C.

   a) 100 °C :

   212,0 °F ☐ 215,3 °F ☐ 221,1 °F ☐ 223,3 °F ☐

   b) 532,5 °C :

   890,5 °F ☐ 907,3 °F ☐ 968,9 °F ☐ 990,5 °F ☐

c) 68 °F :

15 °C ☐ 17,2 °C ☐ 18,8 °C ☐ 20,0 °C ☐

d) 7 982 °F :

4 416,67 °C ☐ 4 500,0 °C ☐ 4 671,78 °C ☐ 4 721,2 °C ☐

Notions de mathématiques

Opérations de base avec les fractions



Une fraction est composée d'un numérateur sur un dénominateur :

$$\frac{\textbf{numérateur}}{\textbf{dénominateur}}$$

Pour les additions et les soustractions, il faut identifier un dénominateur commun à chaque fraction, c'est-à-dire un nombre qui peut se diviser par chacun des dénominateurs.

Une fois le dénominateur commun identifié et les fractions converties, on additionne ou on soustrait selon le cas (en soudure, les dénominateurs communs sont toujours des multiples de deux, soit 2, 4, 8, 16, 32).

Exemples

Addition :

$\frac{5}{16} + \frac{3}{4}$

Comme 16 est un multiple de 4, on convertit $\frac{3}{4}$ en multipliant chaque partie de la fraction par 4 (parce que 16 = 4 × 4).

Donc, $\frac{3}{4} = \frac{3 \times 4}{4 \times 4} = \frac{12}{16}$

et $\frac{5}{16} + \frac{12}{16} = \frac{5+12}{16} = \frac{17}{16}$ ou $1\frac{1}{16}$

Soustraction :

$\frac{19}{32} - \frac{1}{2}$

Comme 32 est un multiple de 2 (2 × 16 = 32), on multiplie chaque partie de $\frac{1}{2}$ par 16.

Donc, $\frac{1}{2} = \frac{1 \times 16}{2 \times 16} = \frac{16}{32}$

et $\frac{19}{32} - \frac{16}{32} = \frac{19 - 16}{32} = \frac{3}{32}$



Exercice 3.2

1. Trouvez un dénominateur commun aux fractions suivantes et cochez la bonne réponse pour chacune.

   a) $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{8}$:

   2 ☐ 4 ☐ 8 ☐ 16 ☐

   b) $\frac{1}{4}$ et $\frac{19}{32}$:

   2 ☐ 4 ☐ 16 ☐ 32 ☐

2. Effectuez les additions et les soustractions suivantes, puis cochez la bonne réponse pour chacune.

   a) $\frac{1}{4} + \frac{7}{16}$:

   $\frac{1}{2}$ ☐ $\frac{11}{16}$ ☐ $\frac{7}{8}$ ☐ $\frac{13}{16}$ ☐

   b) $\frac{21}{32} - \frac{15}{32}$:

   $\frac{6}{15}$ ☐ $\frac{5}{32}$ ☐ $\frac{1}{8}$ ☐ $\frac{3}{16}$ ☐

Règle de trois

La règle de trois est un cas particulier d'équation à une valeur inconnue. Elle s'applique lorsqu'on a des quantités proportionnelles, c'est-à-dire qui augmentent ou qui diminuent ensemble, et lorsqu'on a une valeur inconnue et trois valeurs connues.

Exemple 1

Si on a un plan à l'échelle de 50 mm:1 000 mm (1 m) et qu'on veut connaître la grandeur réelle d'un objet qui mesure 30 mm sur le plan, on doit utiliser la règle de trois. On part du principe que si 1 000 mm = 50 mm, alors ? mm = 30 mm. En nommant la valeur inconnue x, on obtient l'équation suivante :

$$\frac{1000}{50} = \frac{x}{30}$$

On résout cette équation en isolant la variable inconnue :

$$\frac{1\,000}{50} = \frac{x}{30} \rightarrow \frac{1\,000 \times 30}{50} = x$$

Si x est au numérateur dans l'équation, on l'isole en multipliant la partie connue de l'équation par son dénominateur. Attention! Il faut toujours s'assurer que les unités sont les mêmes.

Ensuite, on calcule la valeur de x :

$$x = \frac{30\,000}{50} = 600 \text{ mm}$$

La grandeur réelle d'un objet qui mesure 30 mm sur le plan sera donc de 600 mm.

Exemple 2

On veut dessiner un objet de 43 500 mm sur un plan à une échelle de 40 mm:10 000 mm, alors on pose l'équation comme suit :

10 000 mm = 40 mm, alors 43 500 mm = x mm

donc, $\frac{10000}{40} = \frac{43500}{x}$

Comme x est au dénominateur, on l'isole :

$$\frac{10\,000}{40} = \frac{43\,500}{x} \rightarrow x = 43\,500 \times \frac{40}{10\,000}$$

Si on inverse l'égalité de rapport : $\frac{10000}{40} = \frac{43500}{x}$, on trouve $\frac{40}{10000} = \frac{x}{43500}$. On peut isoler x comme précédemment et obtenir le même résultat.

On calcule sa valeur :

$$x = 43{,}5 \times \frac{4}{10} = \frac{1740000}{10000} = 174 \text{ mm}$$

Un objet qui mesure 43 500 mm en grandeur réelle mesure donc 174 mm sur le plan.



Exercice 3.3

1. Un modèle à l'échelle mesure 5 mm de hauteur. Quelle est sa grandeur réelle si l'échelle est de 1 mm:250 mm ?

   a) 550 mm ☐
   b) 775 mm ☐
   c) 1 250 mm ☐
   d) 1 500 mm ☐

2. Un objet sur un plan est dessiné à une échelle de 3 mm:225 mm. De quelle longueur doit-on dessiner une poutre ayant 12 m de hauteur en grandeur réelle ? (Attention ! N'oubliez pas de convertir les mètres en millimètres pour effectuer ce calcul).

   a) 16 mm ☐
   b) 18 mm ☐
   c) 19 mm ☐
   d) 21 mm ☐

Conversions de fractions en décimales et vice-versa

Lorsqu'on travaille avec des mesures, on doit souvent convertir des fractions en décimales et vice-versa. Cela est particulièrement vrai si on travaille avec des mesures impériales, comme les pouces et les pieds.

Fraction en décimales

Pour convertir une fraction en décimales, il suffit de diviser le numérateur par le dénominateur.

Exemples

$\frac{1}{2} = 1 \div 2 = 0{,}5$

$\frac{3}{4} = 3 \div 4 = 0{,}75$

Décimales en fraction

Par contre, pour convertir des décimales en fraction, on utilise la règle de trois parce qu'il n'y a qu'un nombre limité de fractions qui nous intéresse, soit les divisions de pouce fréquemment utilisées telles que $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{32}$ (valeurs affichées sur le ruban à mesurer).

◆ *Conversion de décimales de pouce en fraction de pouce*

Pour convertir des décimales de pouce en fraction de pouce, on multiplie la valeur des décimales par le dénominateur de la fraction désirée.

Exemple 1

On veut obtenir la valeur de 0,250 en trente-deuxièmes de pouce, alors on trouve le numérateur en multipliant 0,250 par 32 :

$0{,}250 \times 32 = 8$

On obtient donc $0{,}250 = \frac{8}{32}$ ou $\frac{1}{4}$.

Rappel

En présence d'une fraction, lorsque le numérateur et le dénominateur ont un diviseur commun, on peut simplifier la fraction.

Exemples

Le diviseur commun est 3. — $\frac{9}{12} = \frac{3}{4}$

Le diviseur commun est 2. — $\frac{6}{16} = \frac{3}{8}$



Exercice 3.4

1. Convertissez les fractions suivantes en décimales de pouce et cochez la bonne réponse.

   a) $\frac{3}{4}$ po :

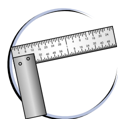
   0,300 po ☐ 0,600 po ☐ 0,750 po ☐ 0,800 po ☐

   b) $\frac{5}{8}$ po :

   0,525 po ☐ 0,580 po ☐ 0,612 po ☐ 0,625 po ☐

   c) $\frac{7}{32}$ po :

   0,219 po ☐ 0,327 po ☐ 0,372 po ☐ 0,444 po ☐



Calculs d'angles

Il existe quelques propriétés intéressantes permettant de calculer la valeur de différents angles de façon très simple.

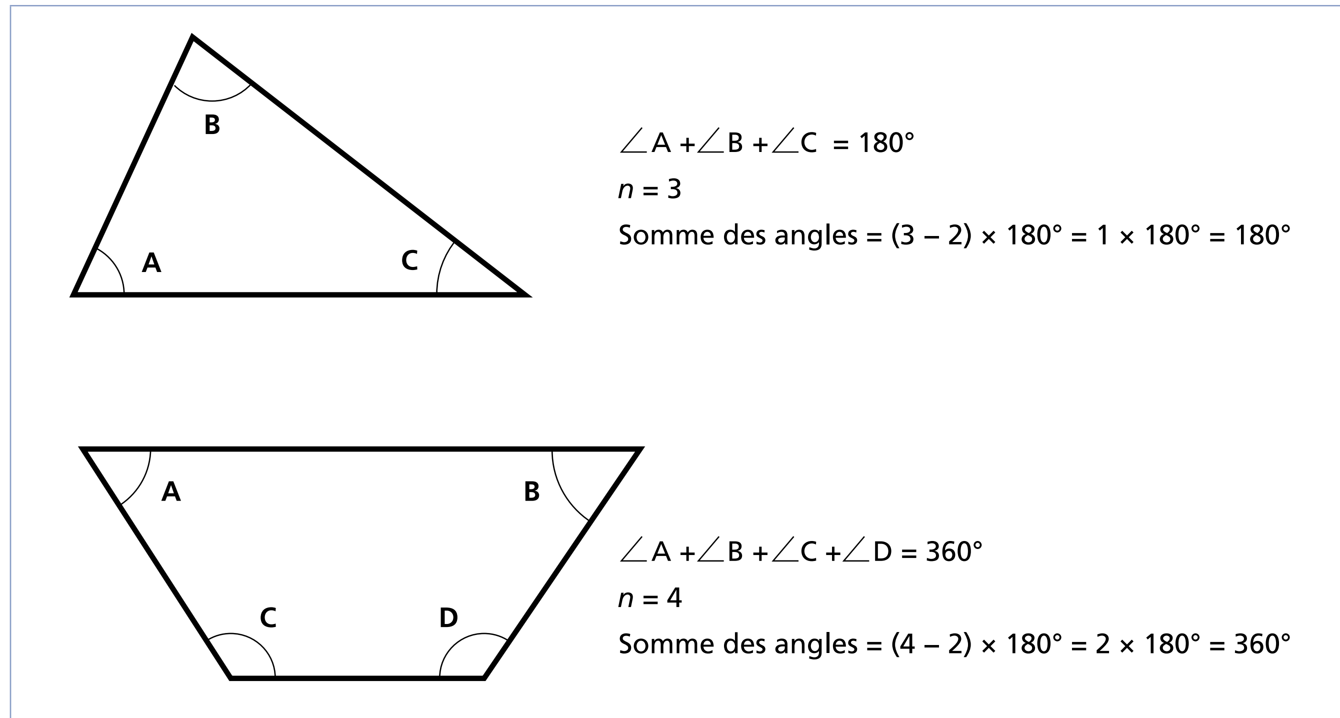
Somme des angles intérieurs

Par exemple, si on a un polygone (forme fermée dont les côtés sont droits) à *n* côtés (*n* = 3, 4, 5 ou plus), la somme des angles intérieurs sera calculée à l'aide de la formule suivante :

$(n - 2) \times 180°$

La somme des angles intérieurs d'un triangle est donc toujours de 180° et celle d'un quadrilatère (carré, rectangle, etc.), de 360° (figure 3.2).

Figure 3.2 Somme des angles intérieurs de polygones à trois et à quatre côtés



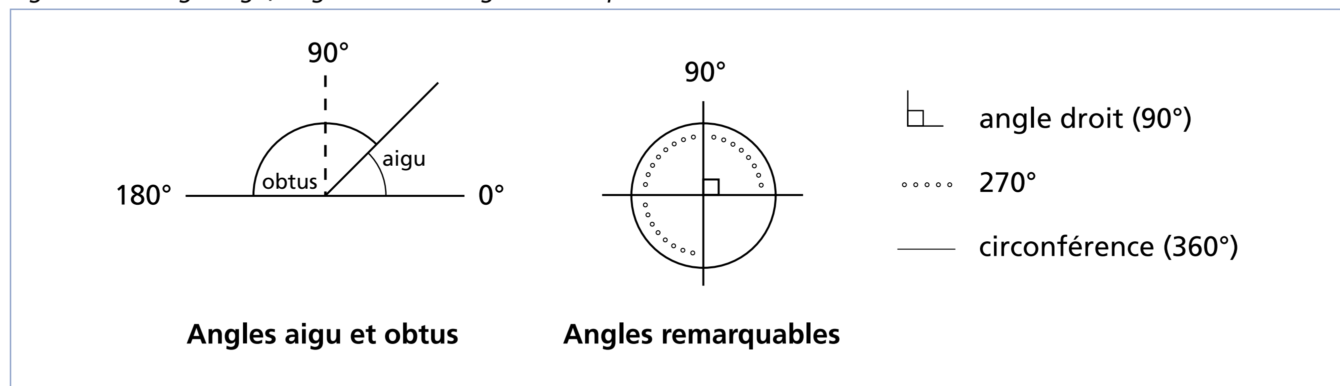
Types d'angles

On peut diviser la plupart des angles en deux catégories (figure 3.3) :

– les angles aigus, dont l'ouverture se situe entre 0 et 90° ;
– les angles obtus, dont l'ouverture varie entre 90 et 180°.

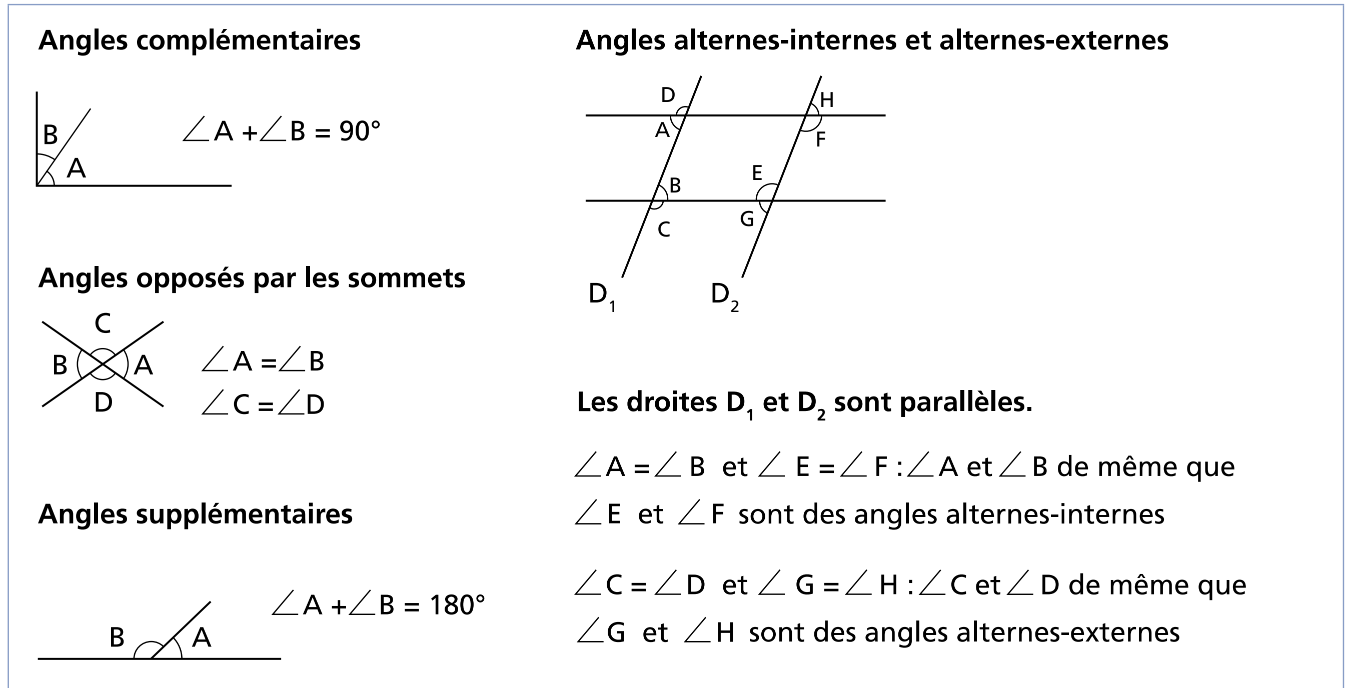
Certains angles sont remarquables et c'est le cas des angles de 0°, 90° (angle droit), 270° et 360°, qui apparaissent aussi à la figure 3.3.

Figure 3.3 Angle aigu, angle obtus et angles remarquables



Les angles possèdent plusieurs propriétés dont certaines sont présentées à la figure 3.4.

Figure 3.4 Propriétés des angles



On remarque que lorsque deux droites se coupent, la somme des angles adjacents (soit des angles possédant un côté commun) égale 180°. On dit alors qu'il s'agit d'angles **supplémentaires**. Si la somme de deux angles égale 90°, on parle alors d'angles **complémentaires.**

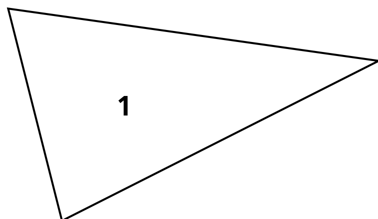
De plus, deux droites qui se coupent forment des angles opposés par le sommet et ces angles sont de même grandeur.

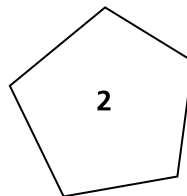
Enfin, une droite qui coupe deux droites parallèles forme avec celles-ci ce qu'on appelle des angles alternes-internes ou des angles alternes-externes, lesquels sont égaux.

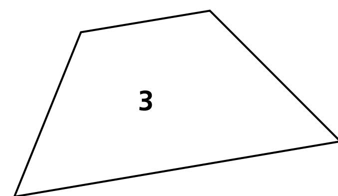


Exercice 3.5

1. Associez ces polygones avec la somme de leurs angles intérieurs.

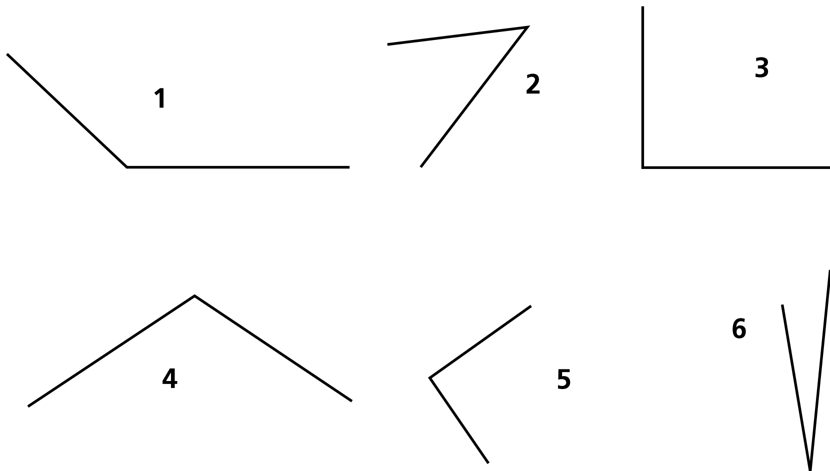






a) 90° b) 180° c) 270° d) 360° e) 450° f) 540° g) 720°

2. Associez les angles 1 à 6 au type d'angle correspondant.



a) Aigu

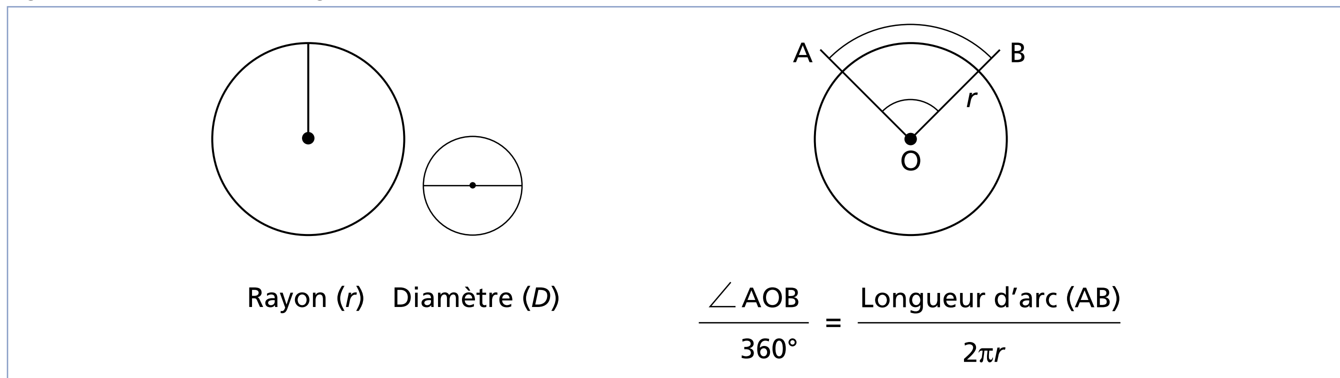
b) Obtus

c) Droit

Longueur d'un arc de cercle

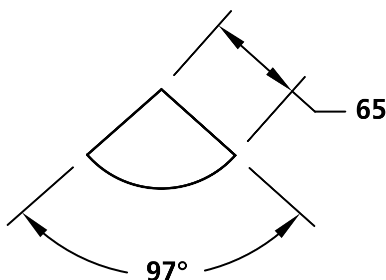
La longueur d'un arc de cercle dépend de l'angle qui le sous-tend. Comme on sait que la circonférence d'un cercle a une longueur de $2\pi r$ (où r est le rayon du cercle) et qu'elle correspond à un angle de 360°, on peut utiliser la règle de trois pour calculer la longueur de l'arc (figure 3.5).

Figure 3.5 Calcul de la longueur d'un arc de cercle



Exemple 1

On cherche la longueur de l'arc de cercle ci-dessous :

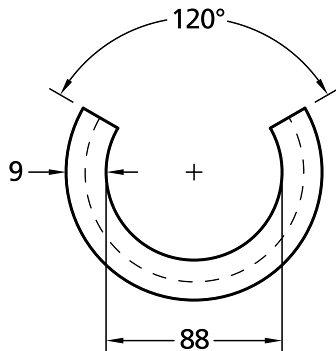


Ici, $r = 65$ et la valeur de l'angle qui sous-tend l'arc est de 97°.

D'après la formule suivante : $\text{Longueur de l'arc} = \dfrac{97^\circ \times 2\pi r}{360^\circ} = 110{,}043$

Exemple 2

On cherche la longueur de l'arc de cercle au centre ci-dessous :



Diamètre intérieur = 88 = $2r_{int}$

Diamètre extérieur = 88 + (2 × 9) = 106 = $2r_{ext}$

Valeur de l'angle qui sous-tend l'arc = 360° – 120° = 240°

Diamètre au centre de la paroi = 88 + 9 = 97 = $2r$

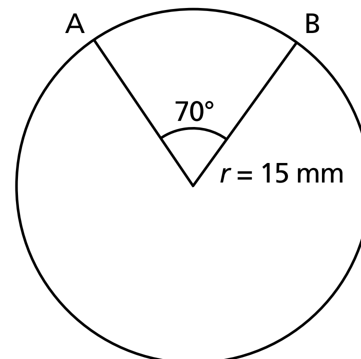
D'après la formule : $\text{longueur de l'arc} = \dfrac{240^\circ \times 2\pi r}{360^\circ} = 203{,}156$



Exercice 3.6

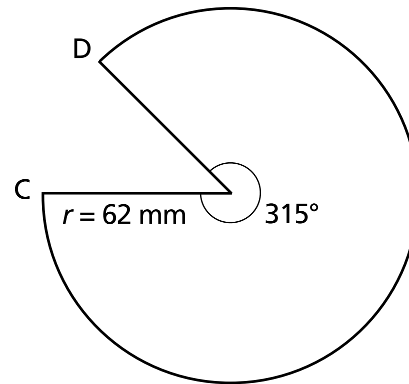
1. Trouvez la longueur de l'arc AB et cochez la bonne réponse.

   a) 18,326 mm ☐
   b) 19,532 mm ☐
   c) 20,123 mm ☐
   d) 21,106 mm ☐



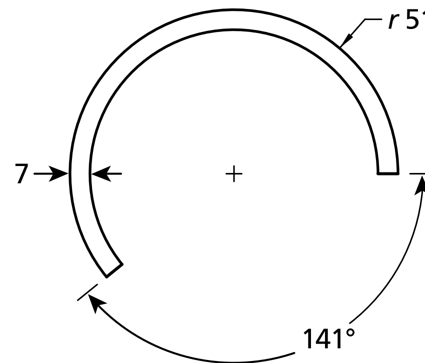
2. Trouvez la longueur de l'arc CD et cochez la bonne réponse.

   a) 318,57 mm ☐
   b) 328,53 mm ☐
   c) 331,84 mm ☐
   d) 340,86 mm ☐



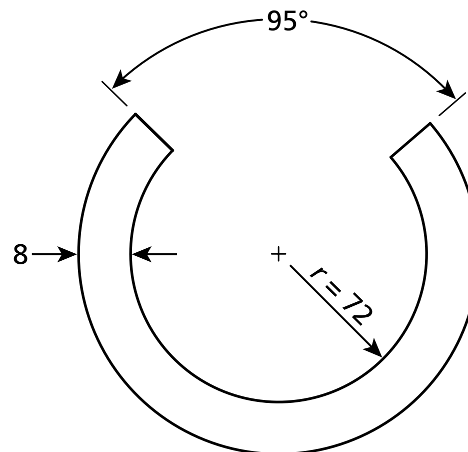
3. Trouvez la longueur de l'arc au centre et cochez la bonne réponse.

   a) 168,180 mm ☐
   b) 181,558 mm ☐
   c) 194,935 mm ☐
   d) 208,314 mm ☐



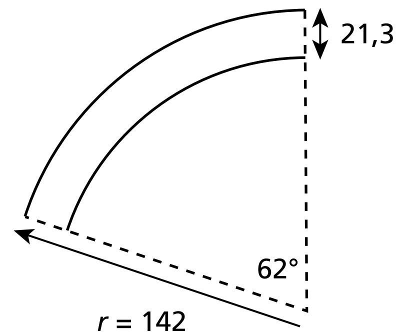
4. Trouvez la longueur de l'arc au centre et cochez la bonne réponse.

   a) 351,509 mm ☐
   b) 362,584 mm ☐
   c) 370,010 mm ☐
   d) 379,845 mm ☐



5. Trouvez la longueur de l'arc au centre et cochez la bonne réponse.

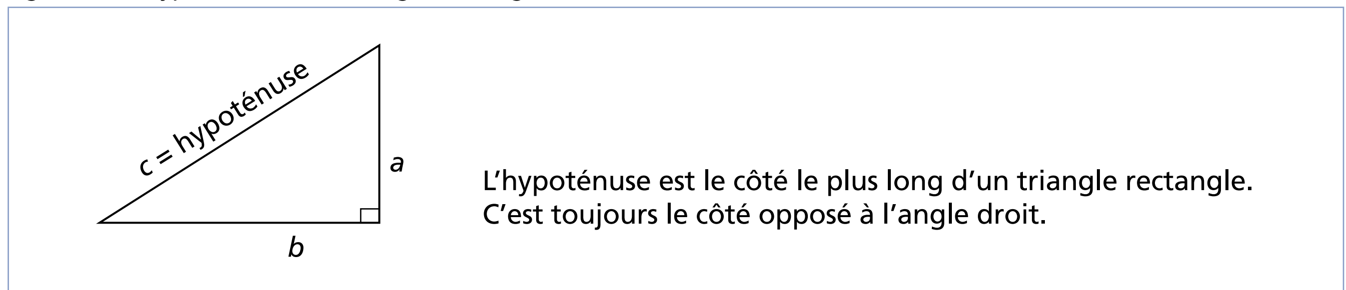
   a) 130,610 mm ☐
   b) 138,721 mm ☐
   c) 142,134 mm ☐
   d) 153,659 mm ☐



Théorème de Pythagore

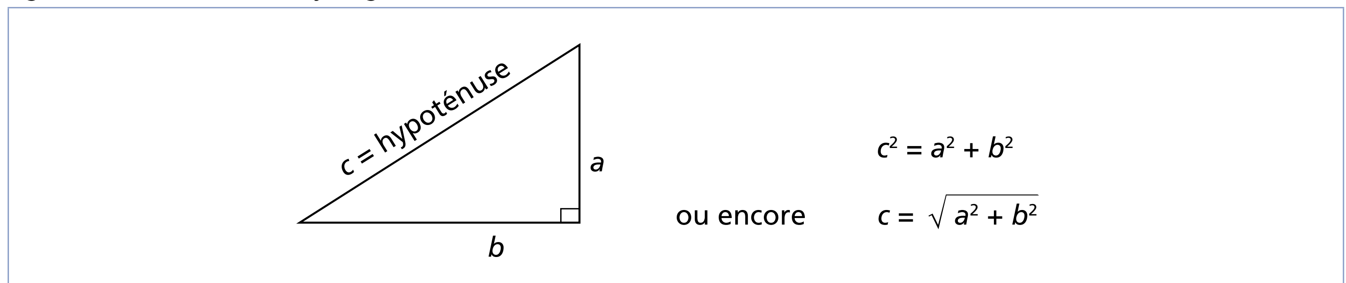
Le théorème de Pythagore est une équation mathématique très utile reliant la longueur des trois côtés d'un triangle rectangle, c'est-à-dire un triangle qui possède un angle droit. Le côté le plus long de tout triangle rectangle s'appelle l'hypoténuse (figure 3.6).

Figure 3.6 Hypoténuse d'un triangle rectangle



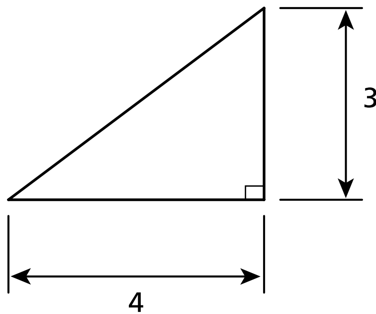
Le théorème de Pythagore nous apprend donc que la longueur de l'hypoténuse au carré est égale à la somme des carrés des longueurs des deux autres côtés (figure 3.7).

Figure 3.7 Théorème de Pythagore



Exemple 1

On veut déterminer la longueur de l'hypoténuse du triangle suivant :



On additionne d'abord les carrés des deux côtés connus :

$a^2 + b^2 = 3^2 + 4^2 = 9 + 16 = 25$

On calcule ensuite la racine carrée pour obtenir la longueur de l'hypoténuse :

$\sqrt{25} = 5$

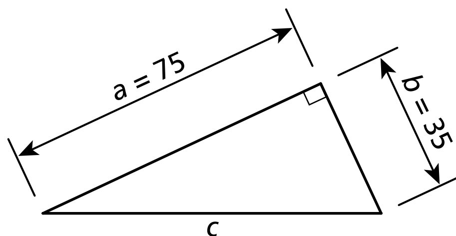
La longueur de l'hypoténuse est donc de 5.



La règle du 3-4-5 peut toujours servir à l'équerrage de pièces de grandes dimensions.

Exemple 2

On veut maintenant déterminer la longueur de l'hypoténuse du triangle ci-dessous :



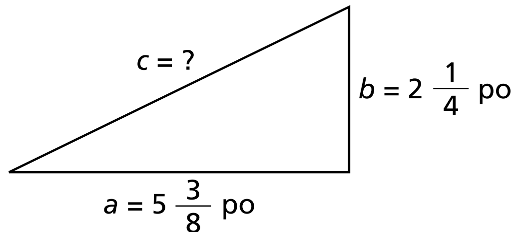
On peut accomplir l'opération en une seule étape sachant que $c = \sqrt{a^2 + b^2}$.

Donc, $c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{75^2 + 35^2} = \sqrt{5625 + 1225} = \sqrt{6850} = 82{,}7647$

L'hypoténuse mesure 82,7647 mm.

Exemple 3

Voici un autre triangle. Il s'agit de calculer la longueur de l'hypoténuse.



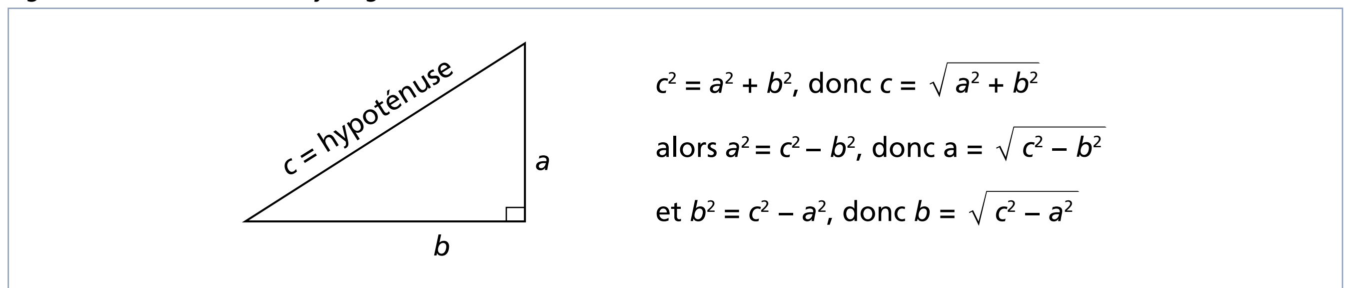
$a = 5\frac{3}{8} = 5{,}375$ po et $b = 2\frac{1}{4}$ po $= 2{,}25$ po

$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{5{,}375^2 + 2{,}25^2} = 5{,}8229$

L'hypoténuse mesure 5,822 9 po.

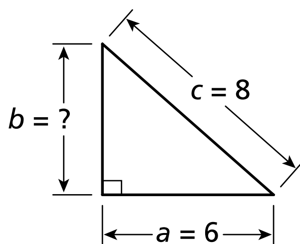
Si on connaît les valeurs de deux côtés du triangle rectangle, on peut toujours trouver la valeur du troisième en utilisant le théorème de Pythagore (figure 3.8).

Figure 3.8 Théorème de Pythagore



Exemple 1

On veut trouver la longueur du côté b de ce triangle :



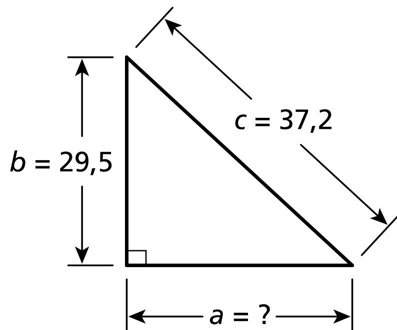
c = hypoténuse = 8 et $a = 6$

$b = \sqrt{c^2 - a^2} = \sqrt{8^2 - 6^2} = \sqrt{64 - 36} = \sqrt{28} = 5{,}2915$

$b = 5{,}291\,5$

Exemple 2

On veut trouver la longueur du côté *a* du triangle suivant :



c = hypoténuse = 37,2 et b = 29,5

$$a = \sqrt{c^2 - b^2} = \sqrt{37,2^2 - 29,5^2} = \sqrt{1383,84 - 870,25} = \sqrt{513,59} = 22,6625$$

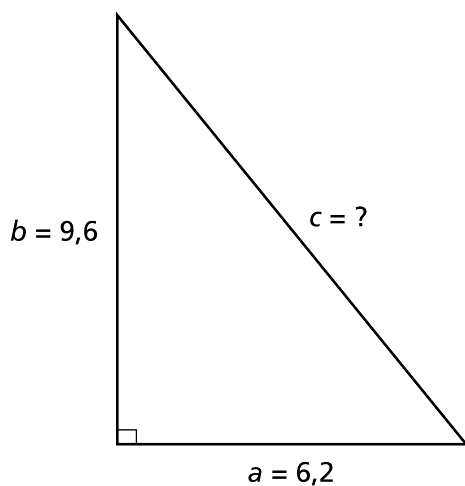
a = 22,6625



Exercice 3.7

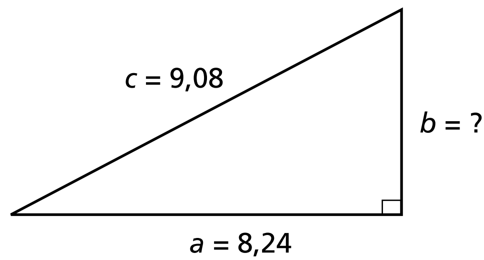
1. Déterminez la longueur du côté inconnu pour les triangles suivants et cochez la bonne réponse.

a)



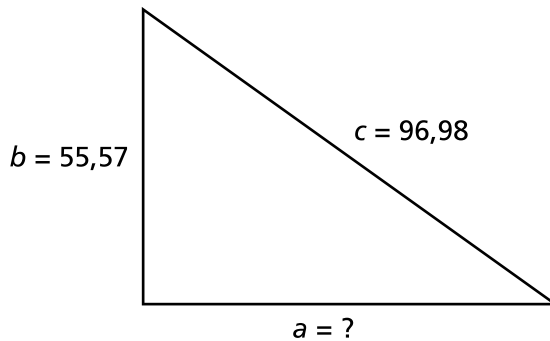
8,35 ☐ 10,43 ☐ 11,02 ☐ 11,43 ☐

b)



2,957 ☐ 3,814 ☐ 4,005 ☐ 4,428 ☐

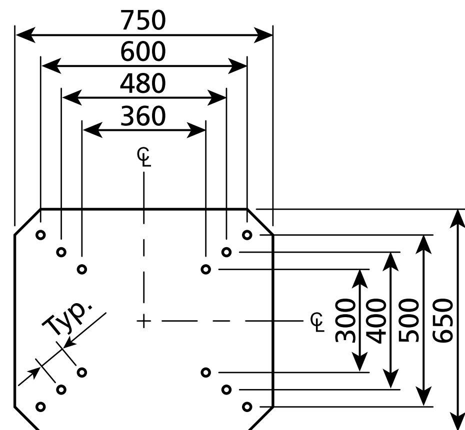
c)



76,154 ☐ 79,480 ☐ 87,021 ☐ 110,639 ☐

2. À l'aide du théorème de Pythagore, trouvez la valeur de la distance centre à centre des trous sur la figure suivante. Cochez la bonne réponse.

   a) 87,201 ☐
   b) 78,102 ☐
   c) 88,222 ☐
   d) 77,111 ☐



Instruments de mesure et de précision

En soudage, on utilise des instruments de mesure pour le traçage, le coupage et la préparation des pièces ainsi que pour la vérification des dimensions et des angles d'une soudure.

Lorsqu'on travaille avec un instrument de mesure, il est important de connaître la précision de la mesure obtenue. Cela nous donne la mesure de la qualité du travail. La précision d'un instrument correspond généralement à la moitié de la plus petite division inscrite sur celui-ci.

Respect des tolérances

En général, les plans exigent des dimensions précises pour les soudures et la coupe des matériaux. Dans la pratique, on aura toujours des variations minimes entre les mesures exigées; par exemple, la largeur d'une soudure peut être de 2,2 mm au lieu de 2 mm. Ces erreurs sont souvent tolérées parce les instruments de mesure utilisés ont eux-mêmes une limite de précision. Pour certains travaux, les tolérances peuvent être fournies. Elles sont alors spécifiques et on doit, au besoin, les vérifier avec des instruments de mesure spécialisés afin de détecter les variations (un micromètre, par exemple).

Les tolérances sont donc implicites (par exemple, si on demande une soudure de 5 mm de largeur, on acceptera une variation de 0,5 mm même si ce n'est pas inscrit) ou explicites (lorsque la dimension de la soudure est inscrite avec la tolérance, par exemple 5 mm ±0,5 mm). Dans les deux cas, on comprend que la soudure doit avoir une largeur d'au moins 4,5 mm et d'au plus 5,5 mm.

Exemples

$1,5 \pm 0,5$ ou $1,5^{+0,5}_{-0,5}$ mm : la dimension de la soudure doit être comprise entre 1,0 et 2,0 mm.

8 ± 1 ou 8^{+1}_{-1} mm : la dimension de la soudure doit être comprise entre 7,0 et 9,0 mm.

$3 \pm 0,5$ ou $3^{+0,5}_{-0,5}$ mm : la dimension de la soudure doit être comprise entre 2,5 et 3,5 mm.

Quelquefois, les tolérances ne sont pas symétriques, c'est-à-dire qu'on peut accepter des variations différentes de chaque côté. On exprime les différentes tolérances par la mesure accompagnée d'un + en haut et d'un – en bas.

Exemples de dimensions de soudure à tolérance asymétrique

$2^{+1}_{-0,5}$ mm : la dimension de la soudure doit être comprise entre 1,5 et 3,0 mm.

$6^{+0}_{-0,5}$ mm : la dimension de la soudure doit être comprise entre 5,5 et 6,0 mm.

$7,4^{+0}_{-1}$ mm : la dimension de la soudure doit être comprise entre 6,4 et 7,4 mm.

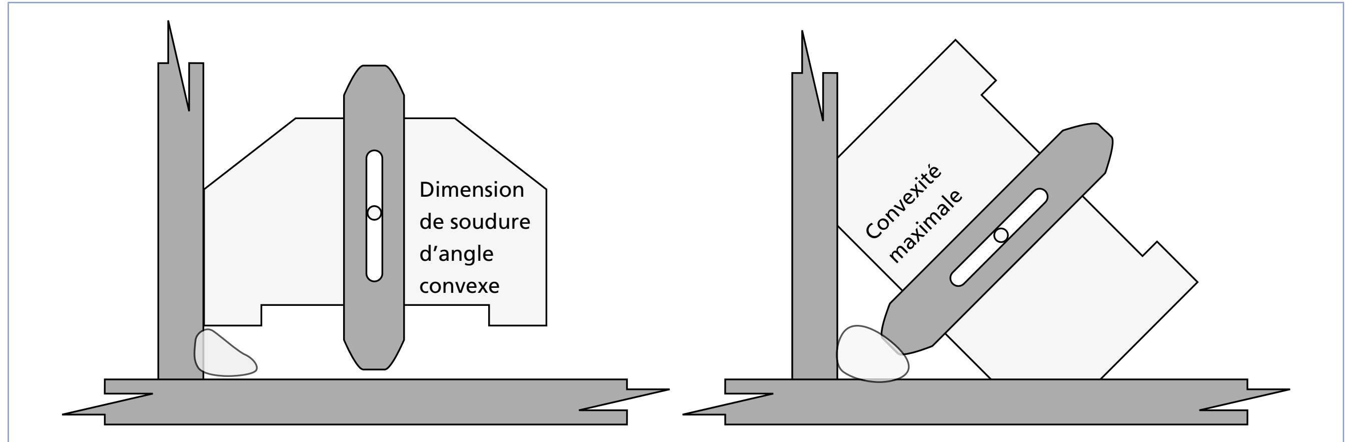
Vérification dimensionnelle des soudures

On peut utiliser différentes méthodes pour mesurer les dimensions d'une soudure, notamment les gabarits et les jauges (pour les soudures d'angle).

Mesure à l'aide d'un calibre polyvalent

Le calibre de mesure polyvalent permet de mesurer les dimensions (largeur, hauteur, épaisseur et convexité) de la plupart des soudures (figure 3.9). Il est ajustable et procure une mesure assez exacte.

Figure 3.9 Calibre de mesure polyvalent

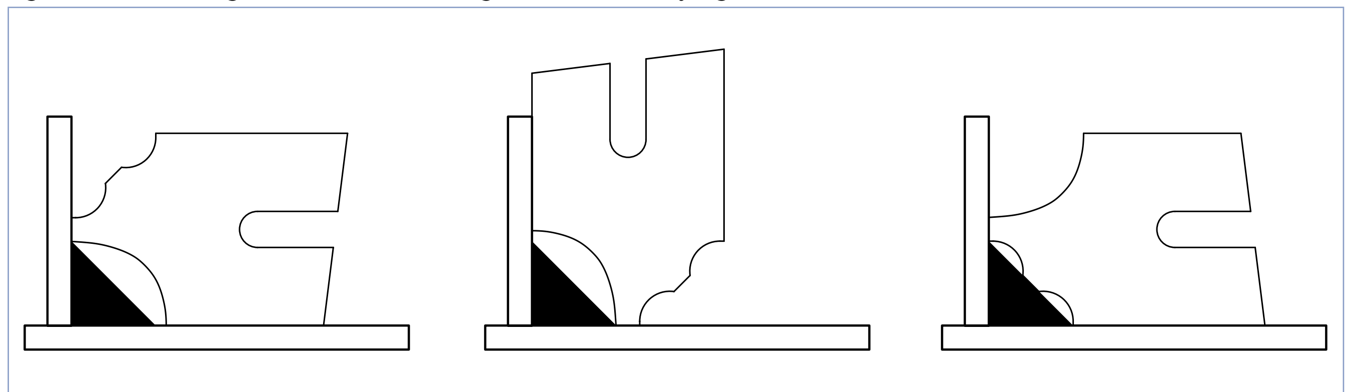


Mesure à l'aide d'une jauge de soudure d'angle

Lorsqu'on utilise une jauge de soudure d'angle, il faut s'assurer de sélectionner la lame qui correspond aux dimensions requises pour la soudure. Les dimensions sont inscrites sur chacune des lames.

Ce type de jauge permet de mesurer la gorge de la soudure ainsi que la dimension de l'empattement (le côté) (figure 3.10).

Figure 3.10 Mesurage d'une soudure d'angle à l'aide d'une jauge



Il est possible que les mesures de la soudure ne correspondent pas exactement à la dimension de la jauge. Dans ce cas, il faut se référer aux tolérances admises afin de déterminer si la soudure est acceptable ou pas.



Exercice 3.8

1. Associez les mesures et les tolérances aux intervalles correspondants.

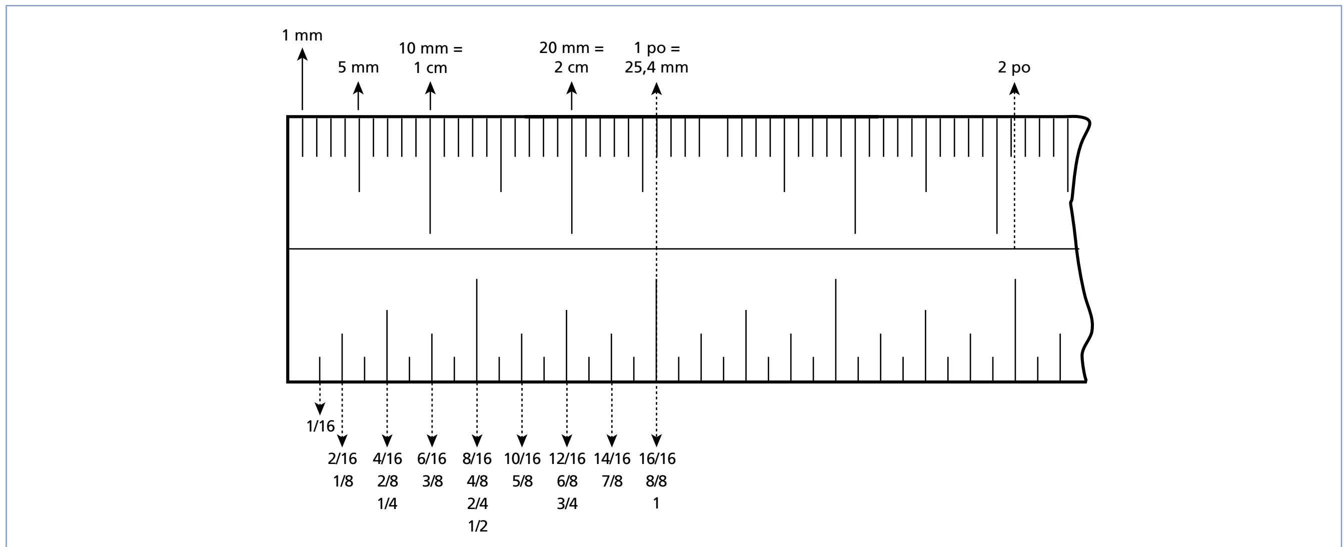
Figure 3.11

Mesures		Intervalles
a) $4,5 \pm 0$	☐	1. 4,0 et 4,5
b) $7^{+1,2}_{-0,3}$	☐	2. 8,0 et 10,0
c) $9 \pm 1,0$	☐	3. 3,5 à 5,5
d) $4,5^{+1}_{-1}$	☐	4. 8,0 et 9,0
e) 9^{+0}_{-1}	☐	5. 2,6 et 3,1
f) $3^{+0,2}_{-0,3}$	☐	6. 6,7 et 8,2
g) $8^{+0,5}_{-0,5}$	☐	7. 2,7 et 3,2
h) $4^{+0,5}_{-0}$	☐	8. 4,0 à 5,0
i) $2,7^{+0,4}_{-0,1}$	☐	9. 7,5 à 8,5

Résumé

– Il existe deux systèmes de mesures utilisés au Canada, le système impérial et le système international (SI) qui est le système officiel.
– Les conversions d'un système à l'autre impliquent des facteurs de conversion qui sont généralement constants, sauf pour la température. Les conversions les plus utilisées en assemblage-soudage sont celles des pouces en millimètres. La figure 3.12 présente les principales conversions entre les deux systèmes de mesure.

Figure 3.12 Équivalences



- On peut multiplier ou diviser les fractions assez simplement. Par contre, pour les additionner ou les soustraire, il faut trouver un dénominateur commun.
- La règle de trois permet de trouver une valeur inconnue lorsque les rapports entre deux mesures sont égaux. Il s'agit alors d'isoler la valeur inconnue d'un côté de l'équation et de faire le calcul. La règle de trois est la base des calculs de conversion de mesures.
- En général, les conversions de fractions en décimales qui nous intéressent concernent les fractions de pouce, les décimales de pied et les millièmes de pouce.
- On trouve le numérateur d'une fraction de pouce en multipliant les décimales par le dénominateur de la fraction recherchée (ex. : par 32 si on cherche des trente-deuxièmes de pouce ou par 8 si on cherche des huitièmes de pouce).
- On trouve le nombre de pouces en multipliant les décimales de pied par 12.
- Il existe plusieurs types d'angles : aigus, obtus et droits (90°). Un angle de 360° fait un cercle complet.
- Les lois des angles permettent de déterminer la valeur d'un angle inconnu :
  - Les angles opposés par les sommets sont égaux.
  - La somme d'angles complémentaires est toujours égale à 90°.
  - La somme d'angles supplémentaires est toujours égale à 180°.
  - La somme des angles intérieurs d'un polygone est toujours égale à : $(n - 2) \times 180°$ (n = nombre de côtés du polygone). Cette relation est utile pour trouver la valeur d'un angle manquant dans un polygone, voire la valeur de tous les angles si on a affaire à un polygone régulier (dont les côtés sont égaux).
- La longueur d'un arc de cercle peut être calculée par l'application de la règle de trois.
  - En effet : $\frac{\text{angle qui sous-tend l'arc}}{360} = \frac{\text{longueur de l'arc}}{2\pi r}$
- Le théorème de Pythagore permet de calculer la longueur d'un côté d'un triangle rectangle lorsqu'on connaît les deux autres côtés.

- En général, la précision d'un instrument de mesure est égale à la moitié de sa plus petite division. En soudage, on doit respecter des mesures à l'intérieur des limites de tolérances définies, lesquelles peuvent être symétriques (la tolérance est égale en plus et en moins) ou asymétrique.
- On peut mesurer la dimension des soudures à l'aide d'un calibre polyvalent. Les jauges de soudures d'angle peuvent être utilisées avec différentes longueurs de lame pour mesurer les dimensions des soudures d'angle.

Notes

Chapitre 4

PROCÉDÉS DE COUPAGE, DE GOUGEAGE ET DE CHANFREINAGE

Dans ce chapitre, nous traitons des opérations connexes au soudage que sont le coupage, le chanfreinage et le gougeage du métal. Les opérations de préchauffage, de maintien des températures entre-passes et de postchauffage des pièces sont traitées dans le chapitre 5.

Préparation des pièces

La préparation des pièces en vue de l'assemblage et du soudage nécessite différentes opérations de coupage, d'usinage et de façonnage du métal, dont les principales sont présentées à la figure 4.1.

Figure 4.1 Opérations, applications et procédés pour la préparation des pièces

Opération	Applications	Procédés
Coupage	– Mise en forme – Préparation des bords	– Avec cisailles – Avec scies – Au coupage thermique
Chanfreinage	– Soudure sur préparation	– Avec chanfreineuse – Usinage – Meulage – Au coupage thermique
Gougeage	– Reprise à l'envers – Préparation en J ou en U	– Arc-air – Au jet de plasma – Oxycoupage – Meulage
Perçage de trous et d'entailles	– Soudure en bouchon – Soudure en entaille	– Avec perceuse – Avec aléseuse – Avec fraiseuse – Avec chalumeau
Pliage	– Mise en forme – Préparation à bords relevés	– Avec plieuse – Au moulinet

Dans les pages qui suivent, nous nous intéresserons davantage au coupage, au chanfreinage et au gougeage du métal, plus particulièrement aux procédés thermiques qui permettent de réaliser ces opérations (figure 4.2).

Figure 4.2 Procédés thermiques et procédés mécaniques de préparation des pièces

Procédés thermiques	Procédés mécaniques
– Oxycoupage – Coupage et gougeage au jet de plasma – Gougeage à l'arc-air	– Avec cisailles – Avec scie – Meulage – Avec chanfreineuse – Avec perceuse – Avec plieuse – Avec poinçonneuse – Avec fraiseuse

Coupage

Le coupage des métaux est une opération courante de préparation des pièces et des joints d'assemblage. Lorsque c'est possible, on utilise un procédé mécanique plus simple, plus rapide, moins coûteux et qui occasionne moins de déformation du métal.

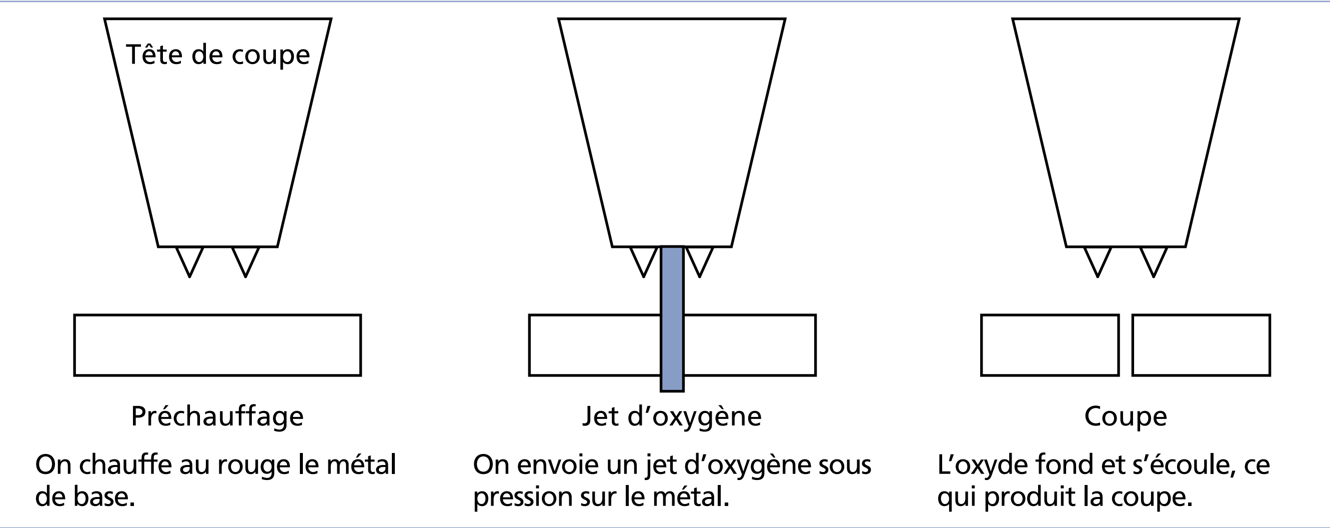
Cependant, en fonction des types de coupes (formes), de l'épaisseur du métal à couper et de la disponibilité des équipements, on peut recourir à des techniques de coupage thermique au gaz ou à l'arc, telles que l'oxycoupage ou le coupage au jet de plasma.

Lorsqu'on coupe un métal à l'aide d'une méthode de coupage thermique, il est important que la surface à couper soit bien nettoyée, notamment parce que la présence de saletés ou d'impuretés nuit à la vitesse de coupe et entraîne un gaspillage d'oxygène (voir la section sur le nettoyage des pièces à la fin de ce chapitre).

Oxycoupage

Le principe de l'oxycoupage consiste à produire, sous l'effet de la chaleur, l'apparition d'oxyde de fer sur un métal ferreux grâce à l'injection d'oxygène. L'oxyde de fer ainsi créé fond sous la pression des gaz et s'écoule ; la coupure du métal est alors réalisée (figure 4.3).

Figure 4.3 Principe de l'oxycoupage



L'oxycoupage permet de couper des métaux ferreux dont la quantité de carbone ne dépasse pas 1,97 % (c'est-à-dire la plupart des aciers). Il convient particulièrement au coupage des aciers doux.

Le procédé est relativement rapide, facile et peu coûteux. Il nécessite peu d'entretien et s'utilise sur les chantiers.

L'oxycoupage peut s'effectuer au moyen d'un chalumeau coupeur complet (figure 4.4), qui contient une tubulure d'oxygène et qu'on relie directement aux boyaux de gaz à la place du chalumeau soudeur. Autrement, on peut connecter une lance de coupe (figure 4.5) au chalumeau soudeur. Cette dernière peut couper des pièces de 100 mm d'épaisseur ou moins.

Figure 4.4 Chalumeau coupeur

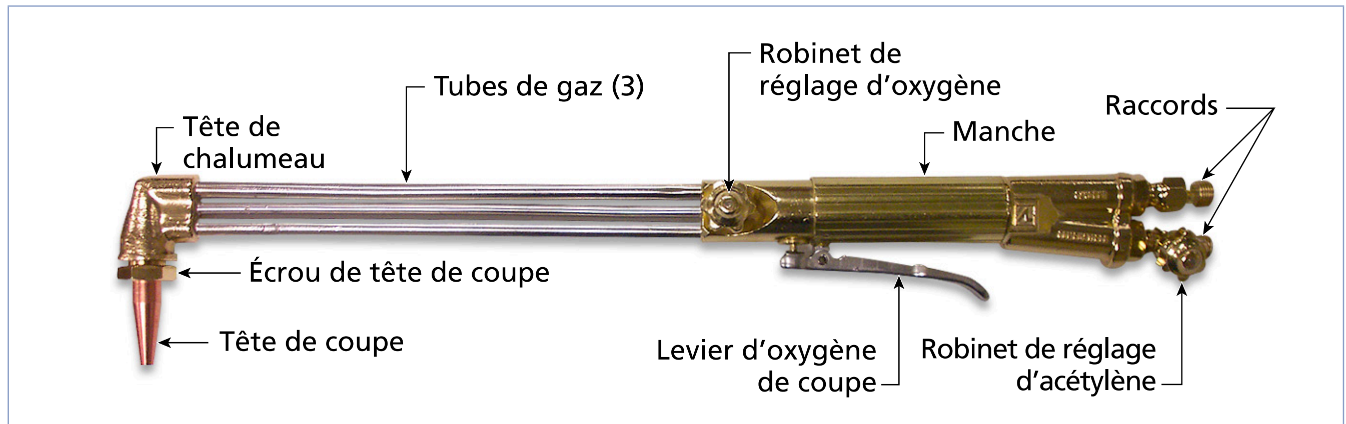
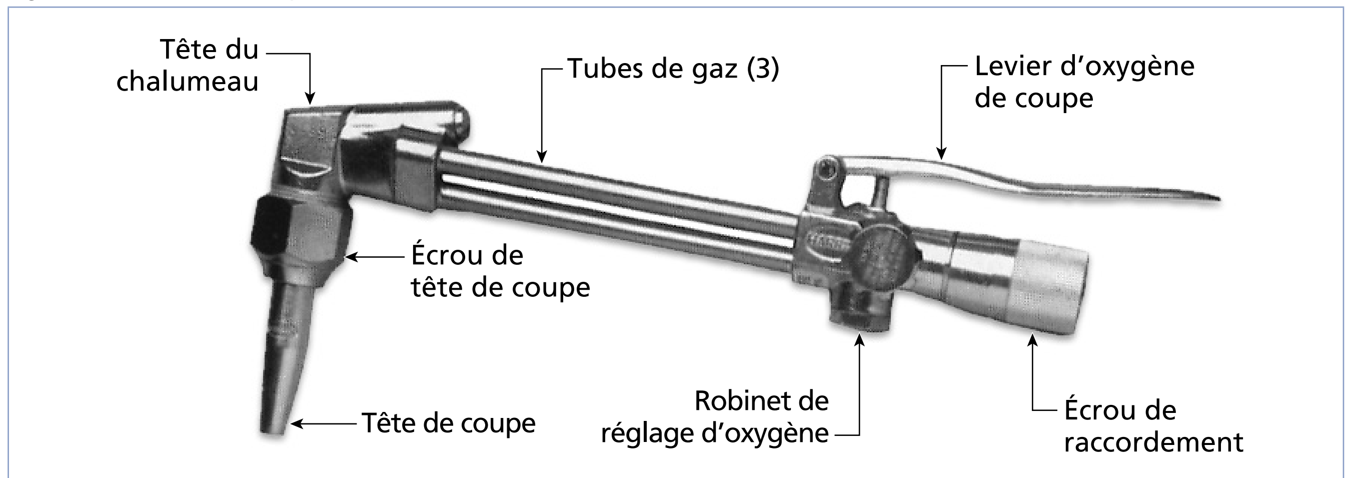


Figure 4.5 Lance de coupe



Il existe de nombreuses têtes de coupe que l'on peut utiliser avec le chalumeau soudeur. Le choix de l'une ou l'autre dépend du type de gaz utilisé, de l'épaisseur du métal à couper et de la vitesse d'avance durant la coupe. Les têtes de coupe sont numérotées en fonction de l'épaisseur du métal à couper. Les fabricants préparent des tableaux de spécifications identifiant le type de buse à sélectionner.

Sélection des gaz

L'oxycoupage utilise deux types de gaz. L'oxygène constitue le gaz comburant (ou oxydant) et sert à oxyder le métal. Afin de permettre l'opération d'oxycoupage, l'oxygène doit être pur à au moins 95 %. Le deuxième gaz est un gaz combustible (ou carburant) qui, activé par l'oxygène, sert de source de chaleur.

Les gaz combustibles généralement utilisés de même que leurs caractéristiques sont présentés à la figure 4.6.

Figure 4.6 Caractéristiques des gaz combustibles

Gaz	Température de la flamme	BTU/pi³	Résistance aux chocs	Autres caractéristiques
Acétylène	3087 °C (5589 °F)	1470	Instable	– Ne s'utilise qu'à des pressions inférieures à 103 kPa (15 lb/po²). – Risques d'explosions pouvant être élevés
Gaz naturel	2538 °C (4600 °F)	1000	Instable	– Est économique. – Se raccorde directement à la ligne de distribution. – Risque de retour de flamme important
MAPP (méthylacétylène-propadiène)	2867 °C (5193 °F)	2371	Stable	– Est très économique. – Exige peu d'espace d'entreposage. – Idéal pour le préchauffage ou le postchauffage – Peut s'utiliser à des pressions atteignant 650 kPa.
Propane	2526 °C (4579 °F)	2498	Stable	– Manipulation simple des bonbonnes et durée d'utilisation plus longue – Est plus pesant et moins volatil que l'air, donc peut s'accumuler sur place et s'enflammer.
Hydrogène	2645 °C (4793 °F)	2700		– Peut être utilisé pour l'oxycoupage sous l'eau. – Résiste à des pressions dépassant 300 kPa.

Durant l'oxycoupage, il faut ajuster la pression des gaz afin d'obtenir une flamme neutre. La figure 4.7 présente les caractéristiques des trois types de flammes.

Figure 4.7 Descriptions et caractéristiques des trois états de la flamme

Flamme	Description	Caractéristiques
Flamme normale ou neutre	Flamme résultant d'un mélange équilibré de gaz. Elle contient autant d'oxygène que de gaz combustible.	– Couleur des dards variant du blanc au bleu pâle – Halo inexistant – Couleur du panache variant du bleu à l'orangé – Température de la flamme oxyacétylénique de 3229 °C
Flamme carburante 	Flamme produite lorsqu'il y a plus de gaz combustible que d'oxygène.	– Couleur des dards variant du blanc au bleu pâle – Halo bleu pâle, généralement de deux à trois fois la longueur des dards – Panache blanc à l'extrémité orange clair – Température de la flamme oxyacétylénique de 3146 °C
Flamme oxydante	Flamme produite lorsqu'il y a plus d'oxygène que de gaz combustible.	– Couleur des dards variant du blanc au bleu pâle – Dards plus minces et plus pointus – Halo inexistant – Panache variant du bleu pâle à l'orangé – Panache plus court que celui de la flamme normale – Température de la flamme oxyacétylénique variant entre 3368 et 3479 °C – Sifflement causé par l'excès d'oxygène

Coupage au jet de plasma

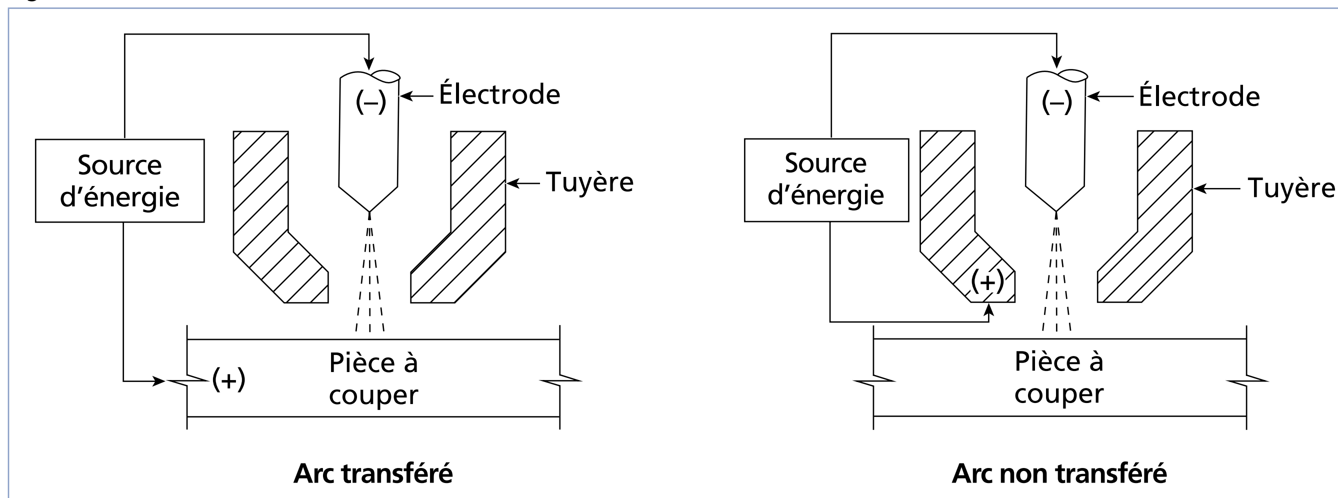
Le coupage au jet de plasma utilise un arc plasmagène pour effectuer la coupe à travers le métal. On l'appelle arc plasmagène parce que le gaz qui le constitue est à un stade tellement chaud sous pression élevée qu'il s'ionise (c'est-à-dire que les électrons se séparent de leur noyau) et prend une forme quasi solide. Ce gaz est en mesure de fondre et d'expulser le métal afin de réaliser la coupe. La figure 4.8 illustre l'embout d'une torche de coupe au jet de plasma.

Figure 4.8 Schéma de l'embout d'une torche plasma

(–)
Électrode
Gaz plasmagène
Gaz froid
(–)
Source
d'énergie
(+)
Chauffage du gaz
entre l'électrode
et la tuyère
(gaz fortement ionisé)
Tuyère : sert à l'étranglement du gaz et à l'augmentation du débit de passage, ce qui contribue à la formation de l'arc plasma.
Transfert de l'arc à
la pièce à travers une
colonne de plasma
Colonne
de plasma
(+)
Pièce à couper

L'arc plasma peut être transféré ou non transféré (figure 4.9). Dans le premier cas, la pièce fait partie du circuit électrique et le coupage est plus efficace, mais lorsque les pièces sont très minces ou non conductrices, elles ne font pas partie du circuit et on obtient un arc plasma non transféré.

Figure 4.9 Arc transféré et arc non transféré



Le procédé de coupage au jet de plasma permet de couper tous les types de métaux, notamment les aciers au carbone, les aciers inoxydables, la fonte, l'aluminium, le cuivre, le nickel et l'étain. Cependant, on recommande des épaisseurs maximales à couper de 25 mm pour l'acier et de 75 mm pour l'acier inoxydable et l'aluminium.

Le coupage au jet de plasma est très précis et rapide. De plus, il ne requiert pas de préchauffage des pièces. Par contre, l'équipement est plutôt coûteux et le procédé, plutôt bruyant.

Sélection des gaz

Le procédé de coupage au plasma utilise deux gaz. L'un d'eux passe autour de l'électrode et forme le plasma : c'est le gaz plasmagène. Le deuxième, généralement de l'air comprimé, passe à l'extérieur de la tuyère et sert au refroidissement : c'est le gaz secondaire. Souvent, on utilise l'air comprimé pour remplir les deux fonctions.

La figure 4.10 présente différents types de gaz plasmagènes de même que leurs principales caractéristiques.

Figure 4.10 Caractéristiques des gaz plasmagènes pour le coupage au jet de plasma

Gaz	Caractéristiques
Air comprimé	– Le plus répandu – Très économique – Convient particulièrement pour le coupage de l'acier au carbone. – Réalise une coupe de qualité sur des pièces dont l'épaisseur est inférieure à 25 mm.
Azote	– Utilisé pour le coupage de l'acier inoxydable et de la plupart des métaux non ferreux – Peu coûteux – Permet de couper une plus grande gamme d'épaisseurs que l'air comprimé.
Mélange d'argon et d'hydrogène	– Permet des coupes de grande qualité. – Améliore la vitesse de coupe. – Utilisé pour le coupage de pièces de toutes épaisseurs – Utilisé pour le coupage de l'aluminium
Argon	– Gaz plus froid produisant des coupes de qualité supérieure.

Paramètres influant sur la qualité de la coupe

Les principaux paramètres qui influent sur la qualité de la coupe et les procédés associés à chacun apparaissent au tableau de la figure 4.11.

Figure 4.11 Paramètres influant sur la qualité de la coupe et procédés associés

Paramètres	Oxycoupage	Coupage au jet de plasma
Choix de l'angle de la tête de coupe	✓	✓
Chauffage approprié	✓	
Choix de la tête de coupe	✓	
Choix de l'électrode		✓
Ajustement de la pression des gaz	✓	✓
Manipulation de l'équipement	✓	✓
État de la tête de coupe	✓	
État de la tuyère		✓
Vitesse d'avancement	✓	✓

On juge de la qualité d'une coupe en fonction des critères suivants :

- saignée droite et lisse ;
- bords nets et carrés, sans scories (arêtes non fusionnées) ;
- surface lisse et nette ;
- stries uniformes et verticales ;
- absence de traces de réamorçage.

La partie A de la figure 4.12 illustre une bonne coupe, tandis que les parties B et C montrent des coupes de qualité respectable, mais présentant de petits défauts.

Figure 4.12 Types de coupes selon la qualité



Défauts de coupe et causes

Les défauts de coupe les plus courants et les facteurs qui en sont à l'origine sont présentés à la figure 4.13.

Figure 4.13 Origines des défauts de coupe les plus courants associés au procédé d'oxycoupage

Défauts	Causes probables	Aspect
Gorge à la partie supérieure de la coupe	– Flamme de chauffe trop puissante – Pression d'oxygène excessive – Tête de coupe trop petite	
Grand retard lors de l'amorçage	– Vitesse de coupe trop rapide	
Fusion d'arêtes	Oxycoupage : – flamme de chauffe trop puissante Coupage au jet de plasma : – vitesse trop lente – courant trop élevé	
Arrachement du métal	– Vitesse de coupe trop lente – Trop de pression	
Faces de coupe déformées	– Tête de coupe encrassée	
Pénétration insuffisante	– Vitesse de coupe trop rapide – Intensité du courant trop faible – Électrode ou tuyère usée ou endommagée – Métal trop épais	
Formation excessive de scories	Oxycoupage : – Avance trop lente ou trop rapide Coupage au jet de plasma : – Vitesse de coupe trop lente – Électrode ou tuyère usée ou endommagée – Mauvaise intensité du courant	



Exercice 4.1

1. Associez les opérations à réaliser aux techniques appropriées.

Figure 4.14

Opérations à réaliser		Techniques de nettoyage
a) Correction des défauts de perçage	☐	1. Meulage
b) Correction d'imperfections des coupes	☐	2. Martelage
c) Dégrossissage	☐	3. Burinage
d) Élimination des scories	☐	4. Limage
e) Polissage	☐	
f) Nettoyage de coins de rainures	☐	

2. Cochez les étapes, parmi les suivantes, qui font partie du processus d'oxycoupage.

   a) On envoie un jet d'oxygène sous pression sur la pièce. ☐
   b) On meule toute la surface de la pièce. ☐
   c) L'oxyde fond et s'écoule. ☐
   d) On préchauffe le métal. ☐
   e) On ajoute un métal d'apport. ☐
   f) On utilise une technique oscillatoire. ☐

3. Quel type de flamme doit-on utiliser pour procéder à l'oxycoupage ?

   a) Flamme carburante ☐
   b) Flamme oxydante ☐
   c) Flamme neutre ☐

4. Associez chaque gaz utilisé lors de l'oxycoupage à sa caractéristique correspondante.

Figure 4.15

Caractéristiques		Gaz
a) Gaz permettant l'oxycoupage sous l'eau.	☐	1. Oxygène (O_2)
b) Gaz économique et pratique, mais présentant un grand risque de retour de flamme.	☐	2. Acétylène
c) Gaz comburant qui sert à couper le métal.	☐	3. Gaz naturel
d) Gaz plus lourd que l'air, dont les bonbonnes se manipulent facilement et qui possède une longue durée d'utilisation.	☐	4. MAPP
e) Le plus stable des gaz combustibles, il est aussi très économique et tolère des pressions élevées.	☐	5. Propane
f) Gaz qu'on ne doit utiliser qu'à des pressions inférieures à 103 kPa à cause des risques d'explosion élevés.	☐	6. Hydrogène (H_2)

5. Qu'entend-on par « gaz plasmagène » ?

a) C'est un gaz instable et explosif. ☐
b) C'est un gaz conservé à une température extrêmement basse. ☐
c) C'est un gaz semi-liquide parce qu'il contient une grande quantité d'humidité et une grande vitesse. ☐
d) C'est un gaz à la limite de la radioactivité. ☐
e) C'est un gaz si chaud, sous pression si élevée, que les électrons se séparent de leur noyau et que le gaz prend une forme presque solide. ☐

6. Associez les caractéristiques suivantes aux procédés de coupage thermiques correspondants.

Figure 4.16

Caractéristiques		Procédés
a) Procédé relativement économique	☐	1. Oxycoupage
b) Procédé qui utilise un gaz carburant et un gaz oxydant	☐	2. Coupage au jet de plasma
c) Procédé permettant de couper tous les types de métaux	☐	
d) Procédé utilisant l'air comprimé	☐	
e) Procédé rapide et précis qui ne requiert pas de préchauffage	☐	
f) Procédé permettant de couper les métaux ferreux contenant jusqu'à 1,97 % de carbone	☐	

7. Associez les propriétés suivantes aux gaz plasmagènes correspondants.

Figure 4.17

Propriétés		Gaz
a) Gaz permettant de couper l'acier inoxydable et la plupart des métaux non ferreux.	☐	1. Air comprimé
b) Gaz très utilisé pour le coupage de l'aluminium et qui procure aussi une grande vitesse de coupe.	☐	2. Azote
c) Gaz plus froid qui produit des coupes de qualité supérieure.	☐	3. Argon
d) Gaz le plus répandu, très économique, mais qui coupe surtout des plaques de moins de 25 mm d'épaisseur.	☐	4. Mélange argon-hydrogène

8. Déterminez si les paramètres suivants influent sur la coupe par oxycoupage, au jet de plasma, les deux ou aucun des deux.

Figure 4.18

Paramètres		Procédés
a) État de la tuyère	☐	1. Oxycoupage
b) Ajustement de la pression des gaz	☐	2. Au jet de plasma
c) Période de refroidissement après la coupe	☐	3. Les deux
d) Vitesse d'avance	☐	4. Aucun des deux
e) Préchauffage approprié	☐	
f) Couleur du métal	☐	
g) Choix de la tête de coupe	☐	

9. Parmi les critères suivants, lesquels témoignent d'une coupe de bonne qualité ?

   a) Une saignée droite et lisse ☐
   b) Des stries uniformes et verticales ☐
   c) De longues stries horizontales zigzagantes ☐
   d) Des bords nets et carrés, sans scories ☐
   e) Des bords arrondis et un peu fondus ☐
   f) Aucune trace de réamorçage ☐

10. Associez les défauts de coupe suivants aux paramètres qui risquent de les causer. Notez qu'un paramètre peut causer plusieurs défauts et qu'un défaut peut survenir pour plusieurs raisons.

Figure 4.19

Paramètres		Défauts
a) Flamme de chauffe trop puissante	☐	1. Gorge à la partie supérieure de la coupe
b) Vitesse trop lente	☐	2. Grand retard lors de l'amorçage
c) Vitesse trop rapide	☐	3. Fusion d'arêtes
d) Vitesse d'avance	☐	4. Arrachement du métal
e) Mauvaise intensité du courant	☐	5. Formation excessive de scories
f) Trop de pression	☐	6. Pénétration insuffisante
g) Pièce d'équipement endommagée ou encrassée (tête de coupe, tuyère ou électrode)	☐	

Préparation des joints (chanfreinage)

La préparation des joints consiste à travailler le rebord des plaques à souder afin de favoriser une soudure de qualité correspondant à celle demandée.

On distingue trois principaux types de préparation des joints avec leurs variantes :

– la préparation à bords droits ;
– la préparation en demi-V ou en V ;
– la préparation en J ou en U.

Plusieurs critères doivent être considérés lors du choix du type de joint à préparer ou du mode de préparation des joints, dont les principaux sont les suivants :

Épaisseur du métal

On peut souder les tôles minces sur les bords, tandis que les tôles d'épaisseur moyenne sont chanfreinées (en V ou en demi-V). Les bords des tôles de grande épaisseur peuvent être préparés en J ou en U. Si on soude avec le procédé GTAW, les bords des tôles minces peuvent être relevés (à la plieuse ou aux moulinets) pour éviter l'utilisation de métal d'apport.

Propriétés requises du cordon de soudure

La préparation des bords doit prendre en compte le type de pénétration voulu (complète ou partielle), de même que la résilience et la charge de rupture que doit posséder le cordon.

Coûts de préparation du joint et du dépôt de la soudure

Lorsque c'est possible, on a recours à des méthodes mécaniques de chanfreinage (notamment la chanfreineuse), lesquelles sont plus économiques. On utilise aussi des plaques de support ou des renforts pour les joints.

Nature du métal

Les métaux légers tolèrent moins bien les préparations en V ou en demi-V. On prépare plus souvent ces métaux avec des joints en J ou en U.

Dimensions, forme et type d'assemblage à souder

Le type d'assemblage (en L, en T, bout à bout) peut influer sur la préparation du joint, de même que le type de soudure (bout à bout, d'angle, etc.).

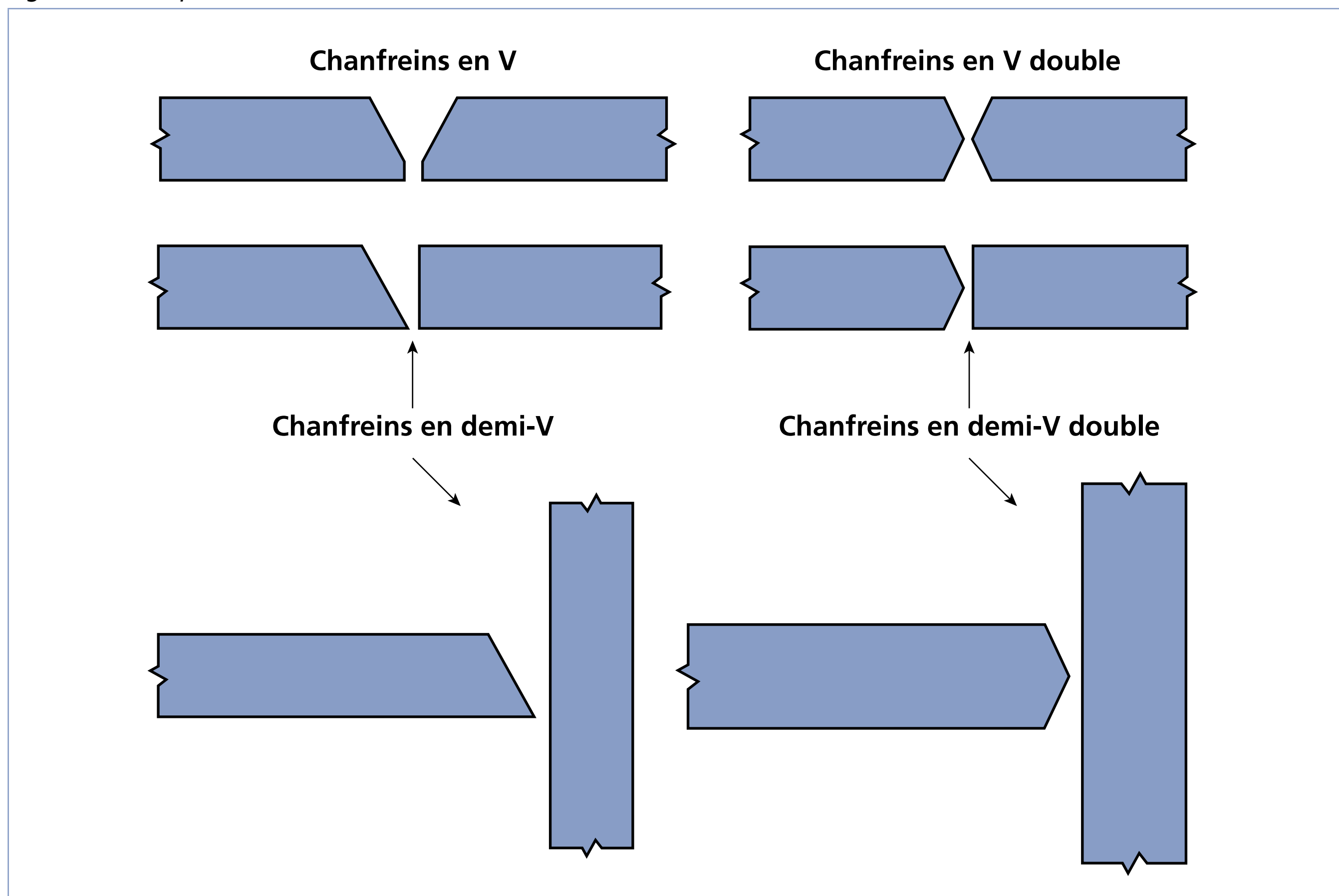
Le tableau de la figure 4.20 présente quelques autres facteurs ainsi que leur influence principale sur le choix du type de joint.

Figure 4.20 Facteurs influant sur le choix du type de joint de soudure

Facteur	Influence principale
Possibilité de réaliser une purge	La possibilité de réaliser une purge permet moins d'écartement entre les plaques.
Position de soudage	La distance entre les plaques, la profondeur et l'angle du chanfrein
Type d'électrode employé	Le type d'électrode détermine la possibilité d'insérer une plaque de support.
Tolérance de l'assemblage	La profondeur de pénétration exigée et les dimensions permises de la soudure limitent le choix du type de joint à préparer.

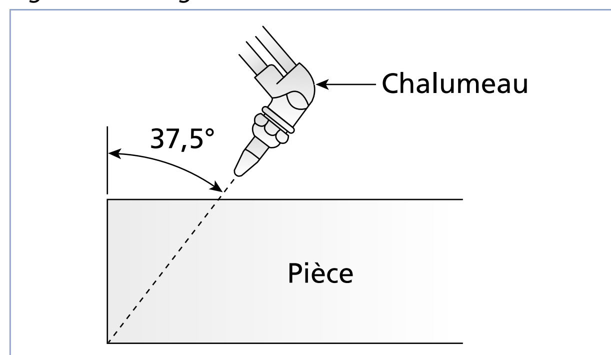
Préparation des joints en V, en demi-V

Figure 4.21 Préparation en demi-V et ses variantes



Le chanfreinage permet de préparer les joints des pièces épaisses afin de permettre la soudure. Il peut être effectué par usinage (notamment par meulage ou à la chanfreineuse) ou par coupage du métal. Les procédés mécaniques sont généralement préférables. Dans tous les cas, il est très important de bien mesurer l'angle du chanfrein afin d'obtenir des résultats appropriés (figure 4.22).

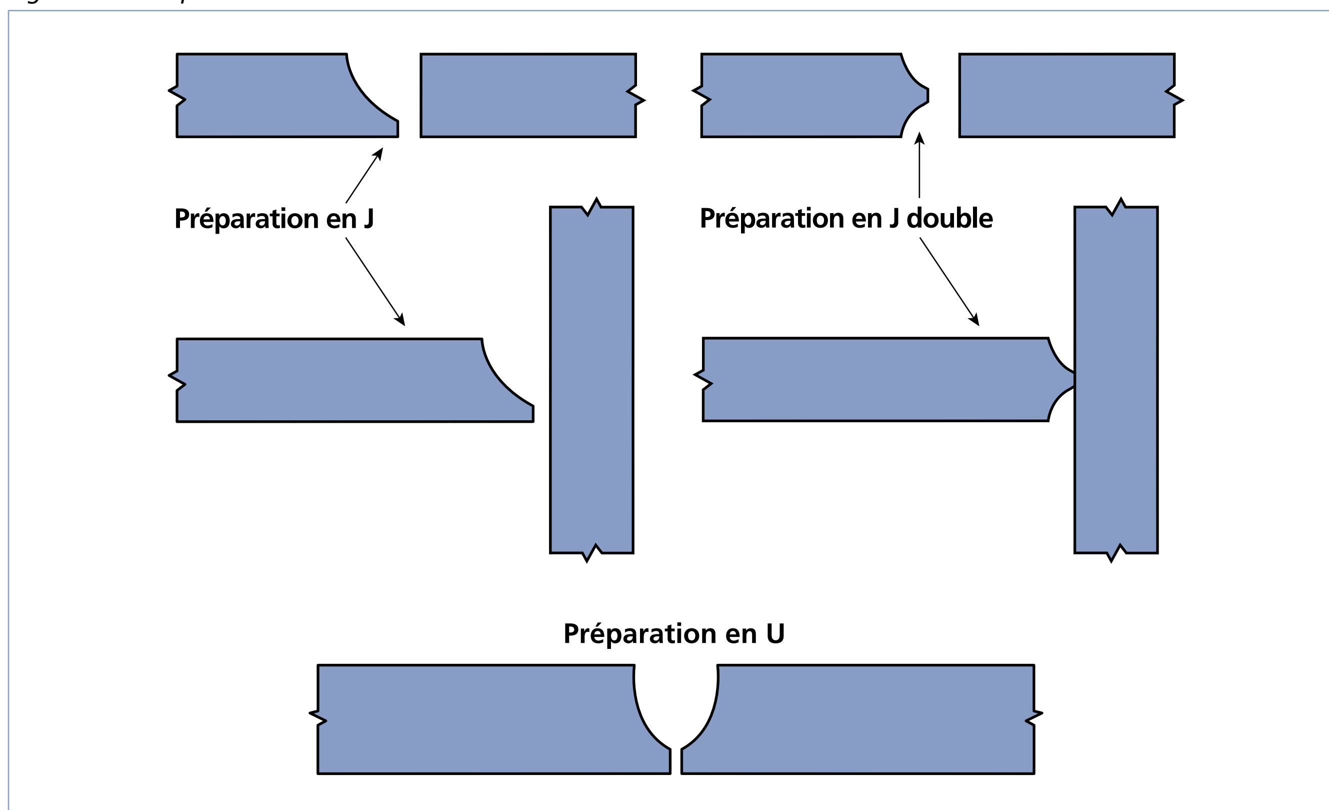
Figure 4.22 Angle du chanfrein



Une fois préparés, les joints en chanfrein doivent être proprement nettoyés pour éviter les défauts de soudure occasionnés par des saletés ou des impuretés à la surface des joints.

Préparation des joints en J et des joints en U

Figure 4.23 Préparation en J et ses variantes



La préparation des joints en J est effectuée sur des plaques très épaisses pour des assemblages en T. Celle des joints en U consiste souvent à une reprise à l'envers effectuée à l'arc-air.

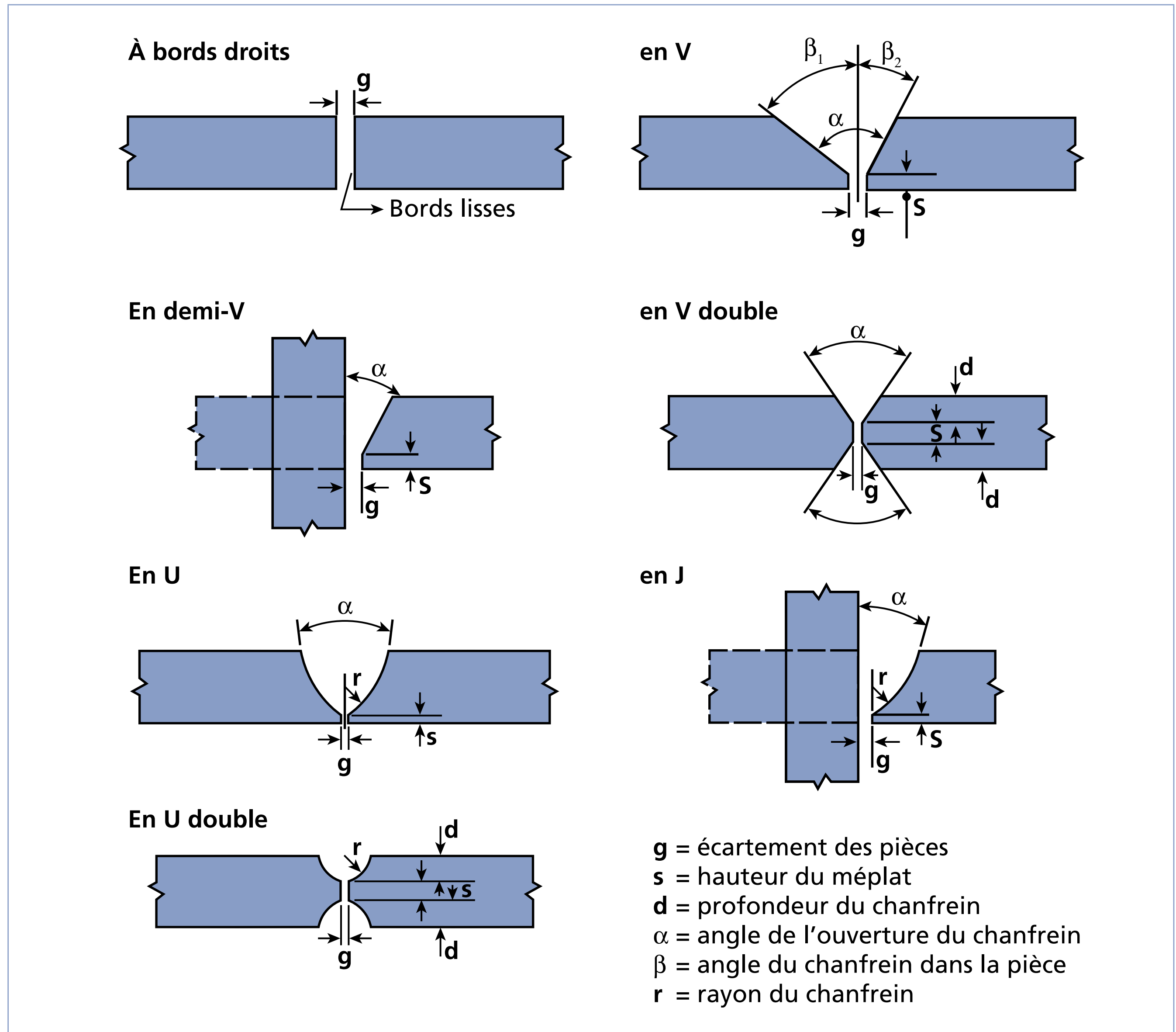
On réalise une préparation afin de diminuer la grosseur du cordon de soudage. Généralement, on a recours à ce type de préparation lorsqu'on travaille avec des métaux non ferreux ; dans ce cas, on travaille le métal par usinage ou par meulage.

Vérification des préparations des joints

Une bonne préparation des joints doit présenter une surface lisse, sans discontinuité, exempte d'oxydation ou de scories si elle a été réalisée par procédé thermique.

L'examen des joints d'assemblage vise à en vérifier les dimensions géométriques, la finition (les bords doivent être lisses), la largeur et la profondeur du joint, la hauteur du méplat, etc. (figure 4.24). On examine aussi le joint afin de déceler des irrégularités à la surface des bords qui pourrait nuire à l'opération de soudage.

Figure 4.24 Éléments devant être considérés lors de la vérification des joints préparés



Pour les chanfreins en angle, la valeur d'angle doit être bien mesurée. De même, les joints en J ou en U doivent être préparés suivant le rayon demandé. La dimension du chanfrein doit aussi correspondre aux spécifications.

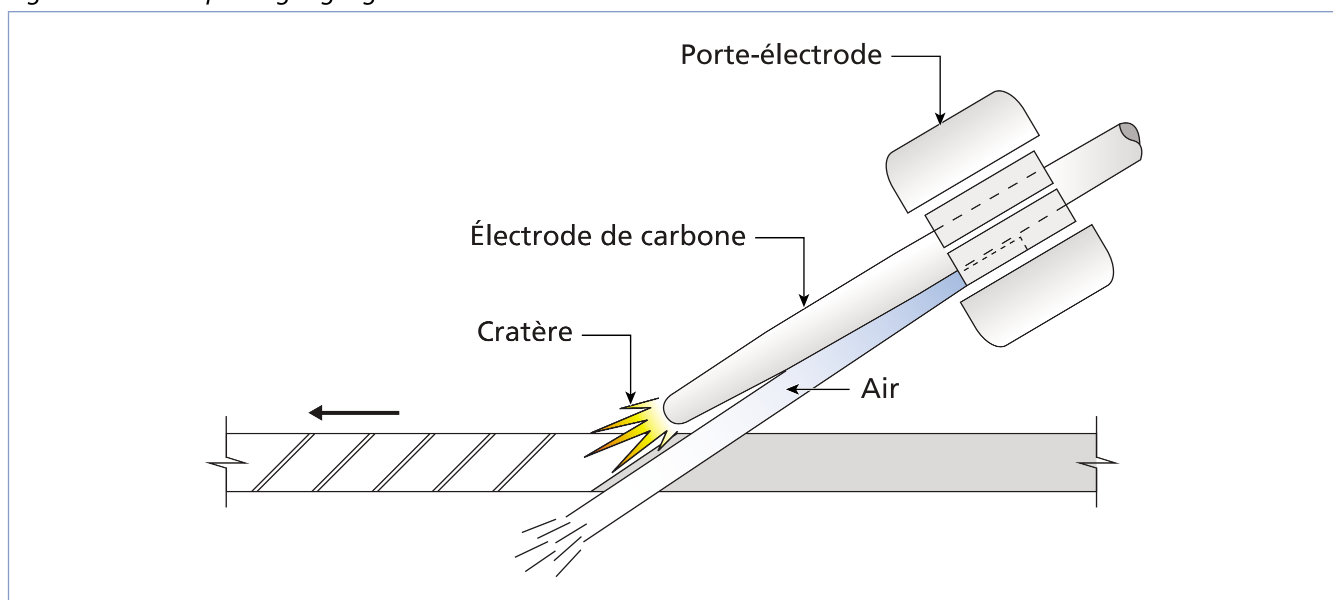
Gougeage

Le gougeage, une opération appliquée aux aciers au carbone, permet de creuser un sillon dans le métal de base pour le préparer au soudage (notamment lors du gougeage de reprise à l'envers), réparer des défauts de soudure externes ou internes (décelés aux rayons X ou à l'ultrason) ou enlever une soudure. Le gougeage peut être effectué soit à l'aide de procédés mécaniques (burinage, meulage), soit à l'aide de procédés thermiques (arc-air, au jet de plasma, oxycoupage).

Gougeage à l'arc-air

Le gougeage à l'arc avec électrode de carbone et jet d'air (ou arc-air) est une technique de découpage qui détruit le métal localement le long d'une saignée, en créant un bain de fusion à l'arc électrique puis en éjectant le métal fusionné à l'aide d'un jet d'air (ou d'oxygène) comprimé (figure 4.25). Le procédé est simple et très rapide, mais bruyant.

Figure 4.25 Principe de gougeage à l'arc-air



La plupart du temps, on utilise le courant continu à polarité inversée pour ce type de travail, mais certaines électrodes sont conçues spécialement pour être utilisées avec un courant alternatif. Le diamètre de l'électrode de carbone dépend de l'intensité du courant (figure 4.26).

Figure 4.26 Diamètre des électrodes de carbone en fonction du courant (CCPI)

Diamètre (mm)	INTENSITÉ – COURANT CONTINU (A)	
	Min.	Max.
3,96	80	150
4,76	110	200
6,35	150	350
7,93	200	450
8,52	300	550
12,70	400	800
15,80	600	1 000
19,05	800	1 400

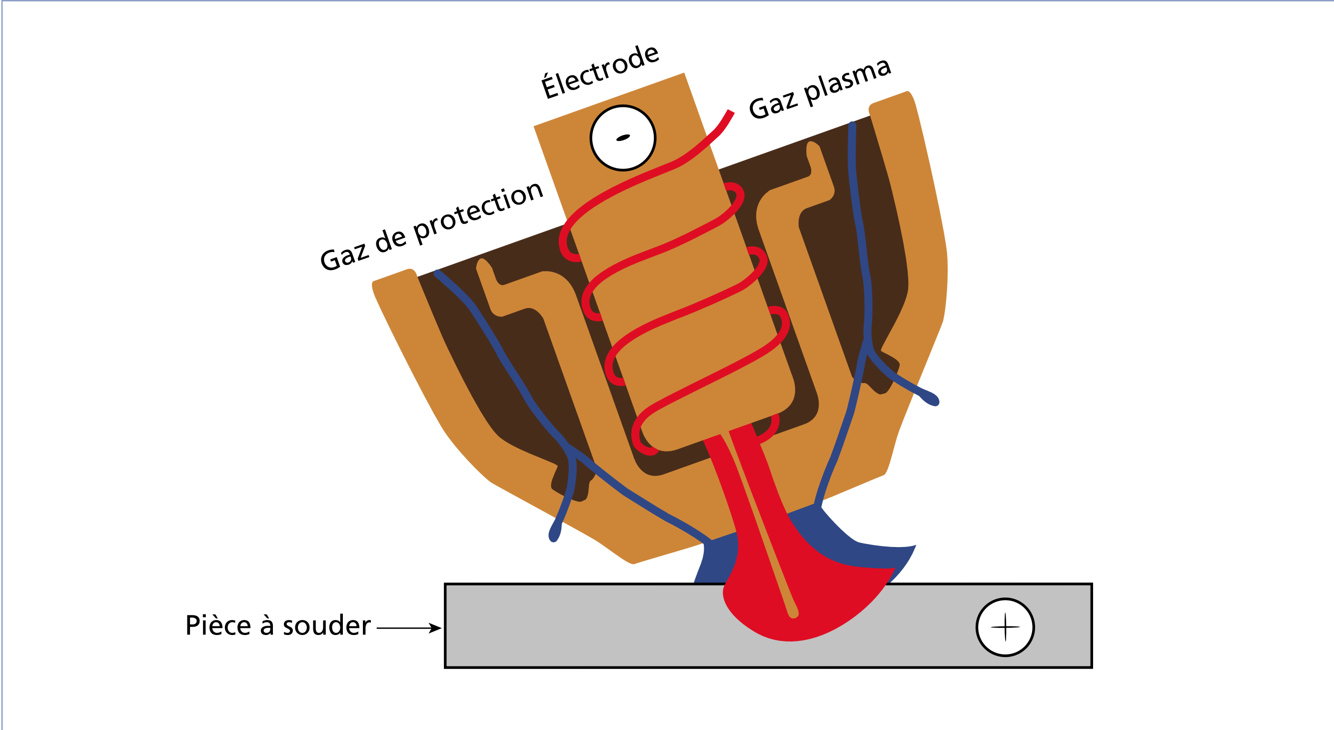
Gougeage à l’arc plasma

Quoique l’arc plasma est généralement connu pour couper les métaux, il constitue aussi un très bon procédé de gougeage. Les deux procédés procurent les mêmes caractéristiques de rapidité, de qualité et de versatilité. De plus, le procédé est moins bruyant que le gougeage à l’arc-air.

On pratique surtout le gougeage à arc-plasma dans les installations équipées du matériel nécessaire au coupage à arc-plasma ; les coûts à investir sont autrement relativement élevés et d’autres méthodes sont favorisées. Lorsque l’équipement pour le coupage à l’arc plasma est disponible, il suffit de posséder quelques accessoires spécifiques au gougeage pour utiliser le procédé correspondant. La tuyère pour le gougeage, notamment, est généralement plus large que pour le coupage (figure 4.27). On utilise les mêmes gaz pour l’un et l’autre des procédés avec sensiblement les mêmes avantages et inconvénients.

Pour les gouges profondes, on travaille avec des angles larges et des vitesses lentes, tandis que des angles de petites amplitudes couplées à des vitesses élevées procurent des gouges étroites.

Figure 4.27 Gougeage à l'arc-plasma



Autres procédés de gougeage

Le gougeage peut être effectué mécaniquement (par exemple, par usinage, meulage ou burinage) ou par d'autres méthodes de coupage, dont l'oxycoupage.

Lors du gougeage par oxycoupage, il faut utiliser une tête de coupe spéciale qui permet d'effectuer le gougeage de la pièce. Comme pour le gougeage à arc-plasma, l'angle de la tête détermine la profondeur du sillon. La vitesse d'avance influe aussi sur l'aspect du sillon (figure 4.28). Le gougeage par oxycoupage ne peut être utilisé que pour le gougeage de pièces de carbone.

Figure 4.28 Influence de la vitesse d'avance sur l'aspect du sillon lors du gougeage par procédé thermique

Vitesse d'avance	Conséquence
Trop lente	Sillon trop large et profond
Trop rapide	Sillon étroit et superficiel

Qualité du gougeage

Un bon sillon est régulier et sans scories. Ses dimensions (largeur et profondeur) doivent être conformes aux spécifications.

Les principaux défauts survenant lors du gougeage d'une pièce sont l'irrégularité du sillon et l'inclusion de scories (figure 4.29).

Figure 4.29 Causes des principaux défauts de gougeage

Défaut	Principales causes
Irrégularité du sillon	– Vitesse d'avance irrégulière – Chaleur excessive ou insuffisante
Inclusion de scories	– Mauvais ajustement de la chaleur – Mauvais nettoyage du sillon

Nettoyage des pièces

Les pièces doivent généralement être nettoyées avant et après les opérations de préparation (coupage, préparation des joints ou gougeage). La méthode de nettoyage dépend du type de saletés présent (figure 4.30).

Figure 4.30 Méthodes de nettoyage en fonction des types de saletés présents sur la surface d'un métal

Type de saletés	Méthodes de nettoyage
Couche de peinture	Brossage à l'aide d'une brosse métallique appropriée au métal à nettoyer* Enlèvement à l'aide du chalumeau
Calamine	Léger préchauffage
Matière grasse	Nettoyage à la vapeur ou à l'aide d'un solvant
Rouille	Meulage, brossage* ou martelage

* La brosse à utiliser dépend du métal à nettoyer; par exemple, il est important de ne pas utiliser une brosse en acier sur des alliages d'aluminium, de titane ou d'acier inoxydable.

Les principales méthodes de nettoyage sont le meulage, le martelage, le burinage et le limage (figure 4.31). On choisit les burins et les limes en fonction du type de travail à effectuer. De même, on choisit les brosses à utiliser en fonction de leur compatibilité avec le métal de base.

Figure 4.31 Méthodes de nettoyage des pièces

Méthode	Rôles
Meulage	– Corriger certaines imperfections des coupes, notamment la présence de stries irrégulières ou d'arêtes vives.
Martelage	– Déloger les scories après une coupe.
Burinage	– Corriger les défauts de perçage. – Éliminer les aspérités sur les plaques métalliques. – Séparer des pièces maintenues par l'oxydation ou la corrosion. – Nettoyer les coins des rainures et les trous carrés.
Limage	– Dégrossir des surfaces. – Polir des pièces.
Brossage	– Éliminer les débris laissés par les autres techniques de nettoyage, notamment le martelage.



Exercice 4.2

1. Parmi les facteurs suivants, cochez ceux qui n'influent pas sur le type de joint à préparer.

   a) Les coûts de préparation ☐
   b) La température du joint ☐
   c) L'épaisseur du métal ☐
   d) La taille de l'atelier ☐
   e) Le type de métal ☐
   f) Le type d'assemblage ☐
   g) La charge de rupture requise pour le cordon ☐

2. Associez les types de plaques avec les types de préparation des bords appropriés.

Figure 4.32

Types de plaques		Types de préparation des bords
a) Plaque épaisse de duralumin (alliage d'aluminium)	☐	1. Joints en chanfrein
b) Tôle mince d'acier à souder bout à bout à l'aide du procédé SMAW	☐	2. Joints en J ou en U
c) Plaque d'acier de moyenne épaisseur	☐	3. Préparation à bords relevés
d) Tôle mince à souder bout à bout à l'aide du procédé GTAW	☐	4. Préparation à bords droits
e) Assemblage en L de plaques d'acier	☐	
f) Assemblage en T de plaques épaisses d'aluminium	☐	
g) Tôle mince de laiton à souder bout à bout à l'aide du procédé GMAW	☐	

3. Cochez les caractéristiques d'une bonne préparation des joints.

   a) La surface doit être chaude au toucher. ☐
   b) La surface doit être lisse sans discontinuité. ☐
   c) Les dimensions de la préparation doivent être respectées. ☐
   d) La surface doit être reluisante. ☐
   e) La surface doit être rugueuse et les arêtes coupantes. ☐
   f) Il ne doit pas y avoir de scories ou d'oxydation sur la surface. ☐

4. À quoi sert le gougeage ?

   a) Réparer des défauts de soudure. ☐
   b) Couper une plaque de métal. ☐
   c) Préparer une reprise à l'envers. ☐
   d) Enlever une soudure. ☐
   e) Creuser un sillon dans un métal. ☐
   f) Ramollir un métal. ☐

5. Vrai ou faux ?

	Vrai	Faux
a) Le gougeage à l'arc-air utilise un arc électrique pour déloger le métal en créant une saignée le long d'un joint.	☐	☐
b) L'oxycoupage ne doit jamais être utilisé pour effectuer une opération de gougeage.	☐	☐
c) On utilise généralement un courant continu à polarité inversée pour effectuer le gougeage à l'arc-air.	☐	☐
d) Il est recommandé de gouger les métaux les plus mous par usinage ou par burinage lorsque c'est possible.	☐	☐

6. Associez les techniques de nettoyage aux types de saletés à déloger correspondants. Il peut parfois y avoir deux réponses possibles.

Figure 4.33

Techniques de nettoyage		Types de saletés
a) Brossage à l'aide d'une brosse métallique	☐	1. Matière grasse
b) Préchauffage	☐	2. Couche de peinture
c) Meulage	☐	3. Rouille
d) Au chalumeau	☐	4. Calamine
e) À l'aide d'un solvant	☐	
f) Martelage	☐	
g) Nettoyage à la vapeur	☐	

Résumé

- Parmi les opérations annexes au soudage, on compte le coupage, le chanfreinage et le gougage.
- Le coupage peut être réalisé par des moyens thermiques ou mécaniques. L'oxycoupage et le coupage au jet de plasma sont les deux principales techniques de coupage thermique. L'oxycoupage permet de couper des pièces d'acier et c'est un procédé relativement économique. Quant au coupage au jet de plasma, il permet de couper tous les métaux.
- La préparation des joints ou de la pièce pour l'assemblage nécessite un bon choix des méthodes et du type de préparation requis. Les tôles minces peuvent être soudées sur bords droits, mais les joints des pièces plus épaisses doivent être chanfreinés (en demi-V, en V) ou préparés (en J ou en U) selon le type de métal et l'épaisseur de la pièce. Cela permet une meilleure soudure. Plusieurs méthodes, tant thermiques que mécaniques, existent pour la préparation des joints.
- Le gougeage permet de réaliser des sillons dans une pièce, des reprises à l'envers, d'enlever une soudure ou de préparer une réparation. Les principaux procédés utilisés par les soudeurs sont le gougeage à l'arc-air et le gougeage plasma. On peut aussi utiliser l'oxycoupage ou des procédés mécaniques tels que le burinage et le meulage.
- Toutes ces étapes sont essentielles dans la préparation des pièces. Un mauvais choix de méthode ou de paramètre peut entraîner des pertes de temps importantes, de même qu'un gaspillage de matériel.
- Lors de la préparation des pièces, les spécifications de préparation doivent être respectées, sinon la qualité et la dimension de la soudure risquent d'être en dehors des normes de tolérances permises.
- La présence de scories ou d'oxydation sur une préparation peut entraîner des inclusions, un manque de pénétration, des soufflures, voire une déformation, etc. Une mauvaise préparation peut même causer la perte totale d'une pièce ou augmenter le coût de production avec des soudures trop volumineuses.
- Le nettoyage, avant et après chaque opération, détermine souvent la qualité du travail obtenue par la suite. Il est important de bien connaître et choisir la méthode de nettoyage des pièces en fonction de leur nature et du type de saletés à éliminer.

Notes

Notes

Chapitre 5

DÉFORMATIONS LIÉES AU SOUDAGE

Lors du soudage, les métaux sont chauffés à des températures très élevées. Cela cause un phénomène de dilatation et de retrait qui n'est pas uniforme sur toute la surface parce que la source de chaleur est localisée autour de la zone à souder. Des déformations peuvent donc survenir à la suite du refroidissement de la zone thermiquement atteinte (ZTA).

Les principales méthodes pour éviter la déformation visent à limiter ou à contrer l'ampleur de la dilatation et du retrait du métal chauffé. On peut les classer en trois catégories : les méthodes thermiques (préchauffage, chauffage et postchauffage), les méthodes de maintien (pointage, bridage, déformations préalables, etc.) et la séquence de soudage.

Déformations thermiques

Le phénomène de dilatation et de retrait thermique des métaux varie en importance en fonction du cœfficient de dilatation de chaque métal. Il varie aussi en fonction des contraintes imposées sur la dilatation.



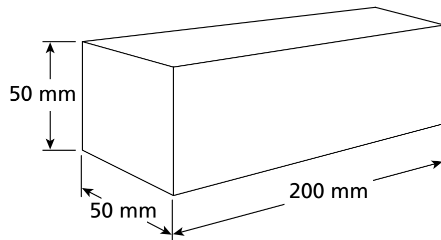
Figure 5.1 Influence de certains facteurs sur la déformation

Paramètres		Déformation
Température	↑	↑
Étendue de la ZTA	↑	↑
Coefficient de dilatation du métal de base	↑	↑

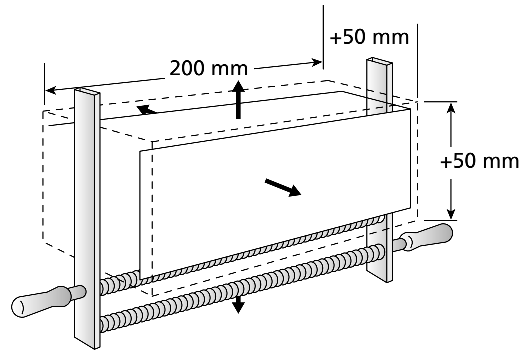
Cependant, les contraintes sont parfois imposées au métal, par exemple lorsqu'on le maintient dans un étau. Dans ce cas, le métal ne peut reprendre sa forme initiale, car les dimensions qui ne se dilatent pas se contractent quand même. La figure 5.2 montre les résultats de l'application de contraintes dans une ou deux dimensions.

Figure 5.2 Dilatation

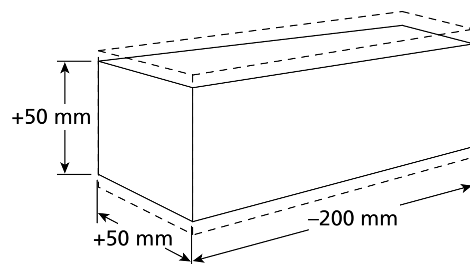
A) Une dimension bloquée



Barre avant le chauffage



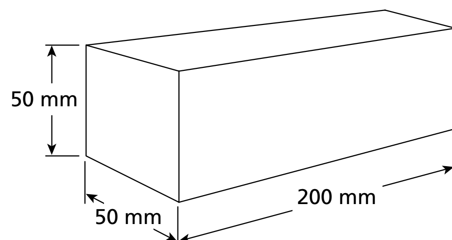
Contrainte empêchant la dilatation dans une direction



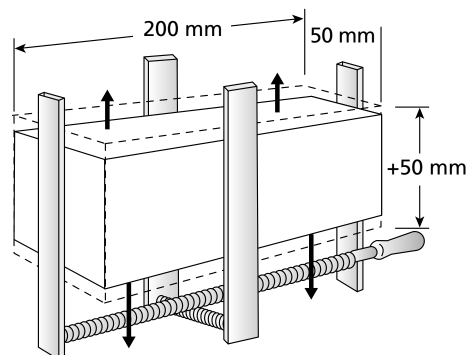
Dilatation ne se produisant que dans deux sens

La dimension qui n'a pu se dilater s'est quand même contractée; elle redevient plus petite qu'au départ. Par contre, les deux autres dimensions redeviennent plus grandes.

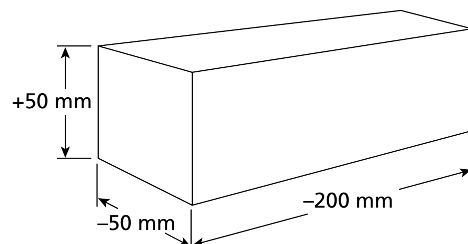
B) Deux dimensions bloquées



Barre avant le chauffage



Contraintes empêchant la dilatation dans deux directions

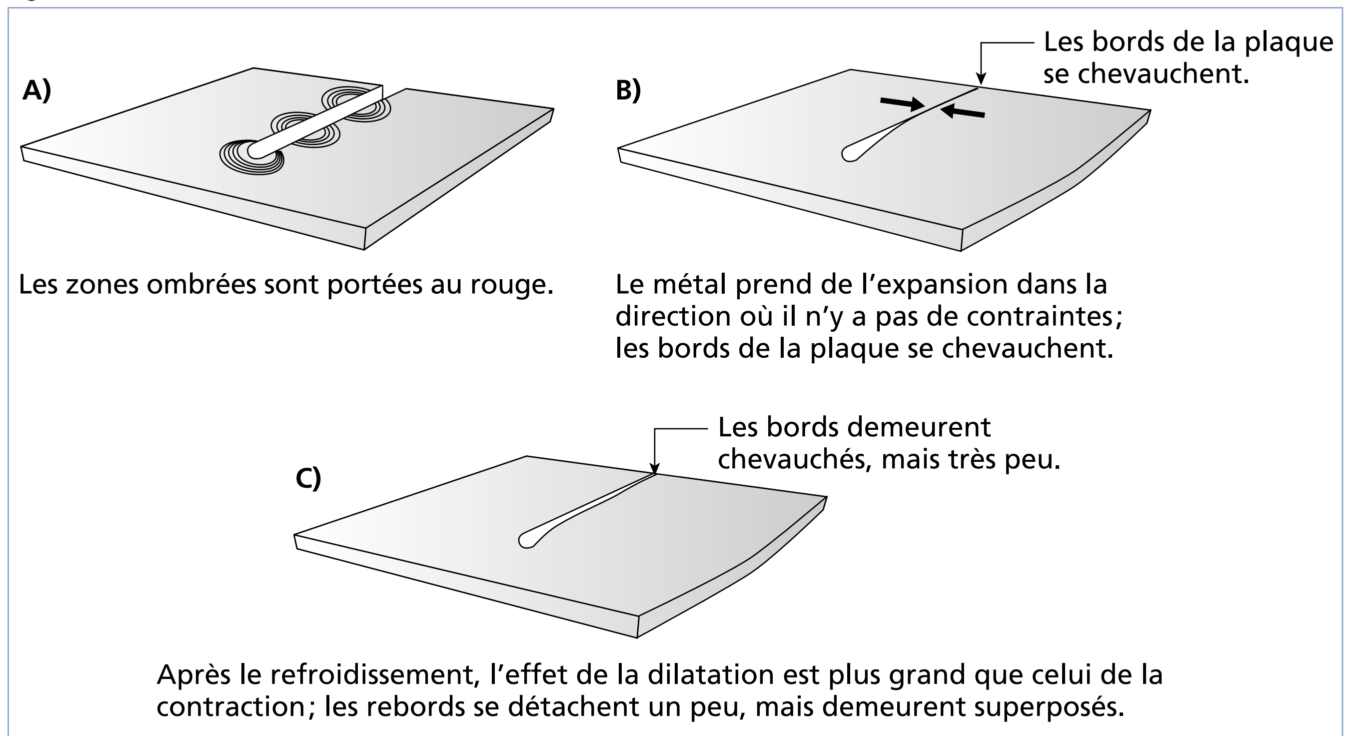


Dilatation s'effectuant dans une dimension

Les dimensions qui n'ont pu se dilater se sont quand même contractées; elles redeviennent plus petites qu'au départ. Par contre, l'autre dimension redevient plus grande.

Finalement, la ZTA se dilate vers l'intérieur, là où le métal est en fusion, ce qui crée un espace permettant une plus grande dilatation du métal. L'effet de charnière illustre ce phénomène (figure 5.3).

Figure 5.3 Effet de charnière





Plus le procédé de soudage transmet de chaleur à la pièce, plus le risque de déformations thermiques est élevé. La figure 5.4 présente les cœfficients de transmission thermique des principaux procédés; plus le pourcentage est élevé, plus la chaleur transmise à la pièce est grande, plus la déformation est grande. Le cœfficient varie en fonction de la longueur de l'arc, de la technique de soudage utilisée et des paramètres de soudage.

Figure 5.4 Cœfficients de transmission thermique de différents procédés de soudage

Procédé de soudage	Coefficients de transmission de la chaleur dans la pièce (%)
Soudage à l'arc submergé (SAW)	90-99
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein (GMAW)	65-85
Soudage à l'arc avec fil fourré de flux (FCAW)	65-85
Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	50-85
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire de tungstène (GTAW)	20-50

Données provenant du Bureau canadien de soudage

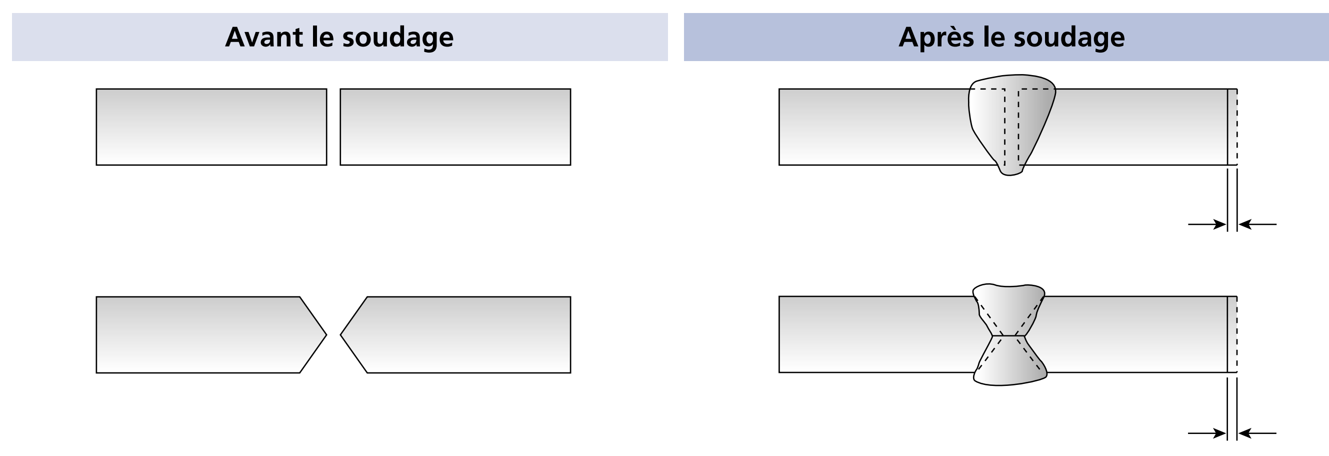
Types de déformations thermiques

En soudage, les principales déformations thermiques appartiennent à l'une ou l'autre des catégories suivantes :

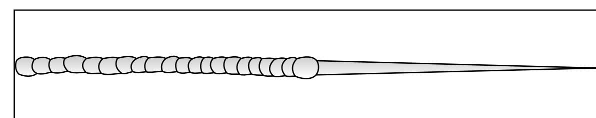
- Retrait transversal (ou latéral) : la taille de la pièce diminue sur les bords ou encore, les deux rebords d'une plaque mince se rapprochent en cours de soudage (figure 5.5).
- Retrait longitudinal : la longueur de la pièce diminue (figure 5.6).
- Déformation angulaire (ou recourbement) : la pièce ou l'assemblage se replie (figure 5.7).
- Gondolement (ou refoulement) : les bords gauchissent et le joint prend une forme d'accordéon (figure 5.8).
- Tensions internes : la structure du métal est modifiée et fragilisée.

Figure 5.5 Retrait transversal

A) Joints à bords droits ou en double V



B) Plaques minces



On peut généralement prévenir le retrait transversal en :
- alignant bien les pièces à souder;
- prévoyant l'angle de retrait;
- réduisant le volume du chanfrein;
- soudant sans balayage;
- réduisant l'apport de chaleur.

Figure 5.6 Retrait longitudinal

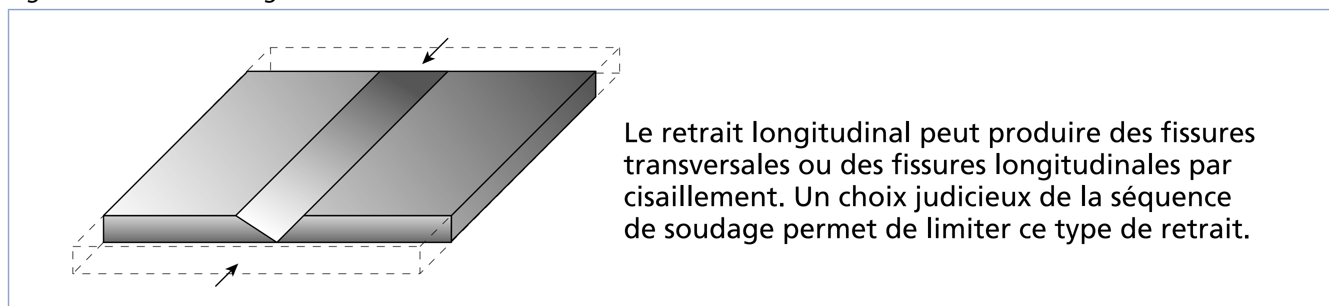
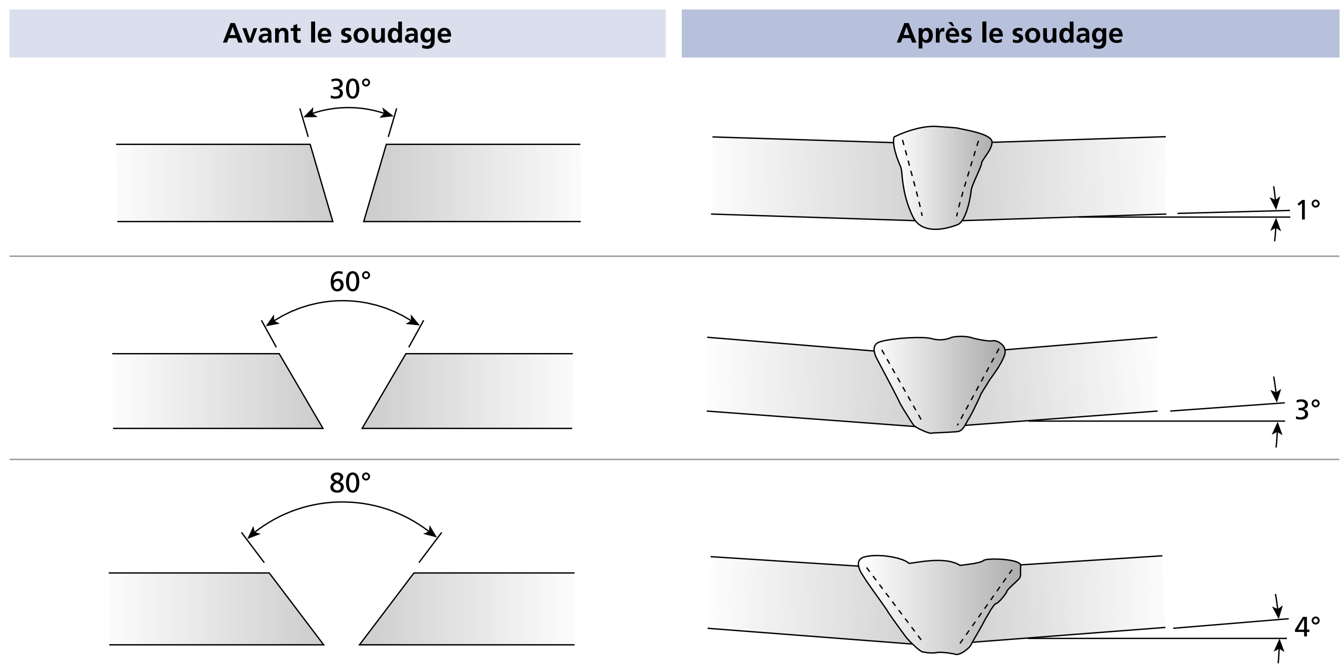


Figure 5.7 Retrait et déformation angulaires

A) Joints en V

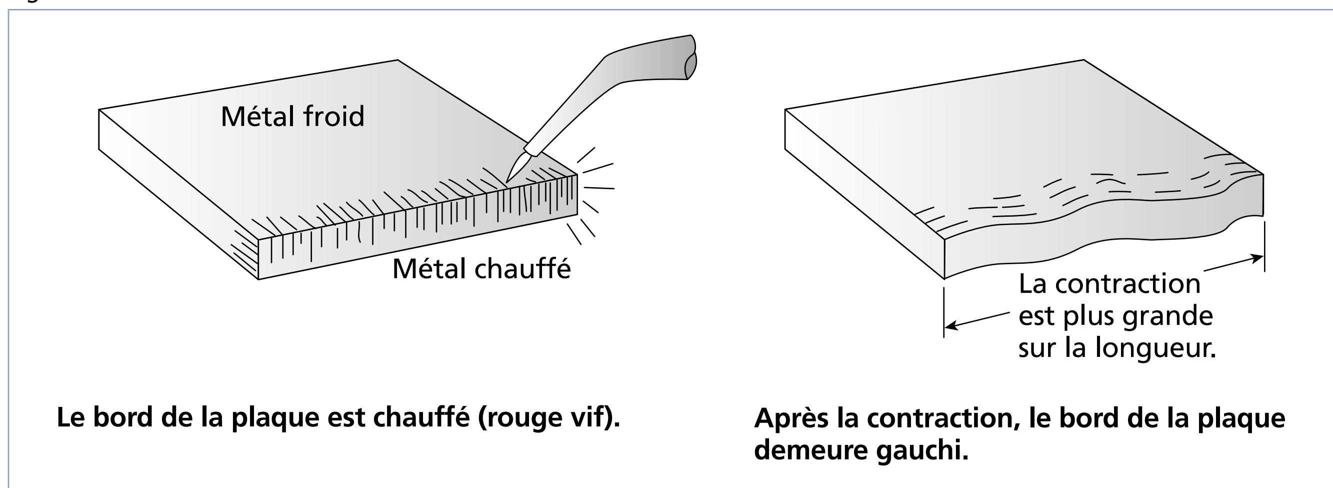


B) Assemblages en T

Avant le soudage	Après le soudage
	2° Une passe de soudage
	4° Trois passes de soudage

Le retrait angulaire se contrôle par l'application de déformations préalables ou par une séquence de soudage appropriée.

Figure 5.8 Gondolement

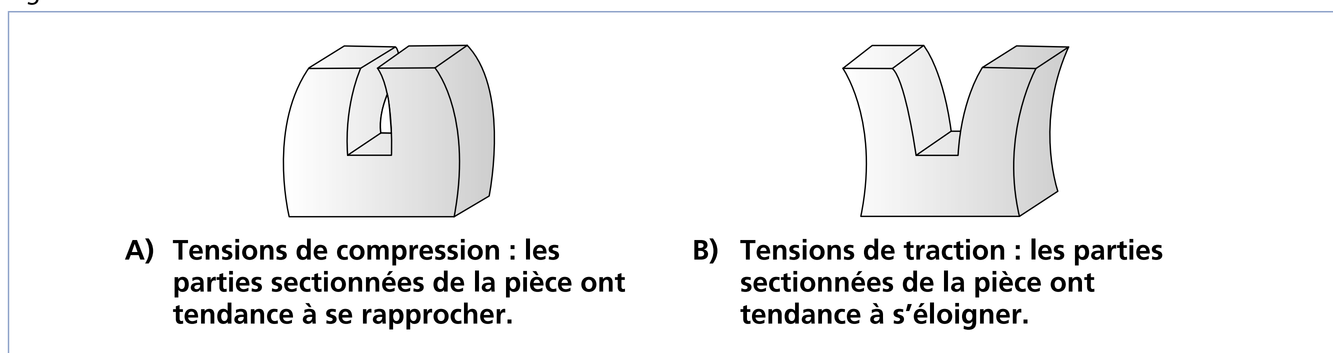


Le bord de la plaque est chauffé (rouge vif).

Après la contraction, le bord de la plaque demeure gauchi.

Les tensions internes sont le résultat direct d'un refroidissement trop rapide. On distingue deux types de tensions internes : les tensions de compression et les tensions de traction. Elles sont généralement invisibles à l'œil nu, mais on peut les reconnaître en sectionnant la pièce (figure 5.9).

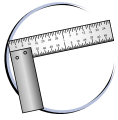
Figure 5.9 Tensions internes



A) Tensions de compression : les parties sectionnées de la pièce ont tendance à se rapprocher.

B) Tensions de traction : les parties sectionnées de la pièce ont tendance à s'éloigner.

Les tensions internes peuvent aussi survenir lorsque la dilatation, et surtout le retrait, sont empêchés. On retrouve un certain niveau de tensions internes dans pratiquement toutes les pièces soudées en raison du chauffage localisé. Un préchauffage non uniforme peut aussi créer des tensions internes. Il s'agit de maintenir ces tensions à un niveau minimal qui ne modifiera pas, de façon remarquable, la résistance du métal.



Les tensions internes peuvent être causées par de nombreuses opérations indépendantes du soudage, comme le pliage ou le sciage des pièces.

Des tensions internes trop importantes mènent à la création de fissures dans le métal. Les aciers à forte teneur en carbone sont plus vulnérables à la formation de tensions internes parce qu'ils sont plus fragiles. En général, un préchauffage uniforme et approprié permet de prévenir l'apparition de tensions internes.

Défaut d'alignement et défaut d'angle

Un défaut d'alignement résulte du non-respect de l'axe prévu entre deux pièces (figure 5.10). Il peut survenir si les deux pièces ne sont pas bien maintenues ensemble lors du soudage.

Figure 5.10 Défaut d'alignement

Désignation	Commentaire	Illustration
Défaut d'alignement	Non-respect de l'axe prévu entre deux pièces soudées. Ce défaut s'exprime généralement par la mesure d'une dénivellation.	

Un défaut d'angle survient lorsque l'angle entre deux pièces soudées n'est pas conforme (figure 5.11). Une déformation angulaire peut être le résultat du retrait inégal ou d'un mauvais positionnement des pièces.

Figure 5.11 Défaut d'angle

Désignation	Commentaire	Illustration
Défaut d'angle	Non-respect de l'angle prévu entre deux pièces soudées	



Exercice 5.1

1. Dans la figure 5.12, associez chaque description avec le type de déformation thermique correspondant.

Figure 5.12

Descriptions		Types de déformation
a) La longueur de la pièce diminue après chauffage.	☐	1. Retrait transversal
b) Lors du chauffage, les bords de la plaque se rapprochent.	☐	2. Retrait longitudinal
c) Constitue le résultat d'un processus de dilatation/retrait bloqué par des contraintes.	☐	3. Déformation angulaire
d) À la suite du chauffage, l'assemblage penche vers la zone de soudure.	☐	4. Gondolement
e) Les bords prennent une forme d'accordéon.	☐	5. Tensions internes

2. Vrai ou faux ?

	Vrai	Faux
a) Une augmentation de la ZTA augmente les risques de déformation.	☐	☐
b) Plus le cœfficient de dilatation est bas, plus les risques de déformation sont élevés.	☐	☐
c) Plus la pièce est épaisse, plus les risques que le soudage entraîne des tensions internes sont élevés.	☐	☐
d) Plus la température de soudage est élevée, plus les risques de déformation sont élevés.	☐	☐
e) Les tensions internes sont souvent visibles à l'œil nu.	☐	☐

Méthodes pour éviter les déformations

Plusieurs méthodes existent pour éviter les déformations de soudage. On doit prévoir une préparation adéquate des joints, une vitesse de soudage la plus rapide possible et une réduction du nombre de passes de soudage au minimum (figure 5.13). D'autres méthodes incluent le préchauffage, le chauffage, le bridage et le pointage.

Figure 5.13 Effets de différents paramètres sur les déformations lors du soudage

Paramètres		Effet sur la présence de déformations
Bonne préparation des joints		↓
Nombre de passes	↑	↑ *
Vitesse de soudage	↑	↓

* Augmente les risques de déformations angulaires, mais diminue les risques de déformations longitudinales.

Chauffage et préchauffage

Le chauffage (ou préchauffage) permet de diminuer la vitesse de refroidissement d'une pièce de même que la différence de dilatation entre la ZTA et le reste de la pièce.

La diminution de la vitesse de refroidissement minimise les risques de trempage de la pièce, qui créent des tensions internes. Comme la différence de température entre la ZTA et le reste de la pièce est moins élevée, cela lui permet de se dilater plus uniformément en limitant les contraintes à la dilatation créées par la région non chauffée par le processus de soudure. Le chauffage assure également l'évaporation de l'humidité dans la pièce, donc une diminution de l'hydrogène présent ; le risque de fissure à froid est ainsi minimisé.

En général, le préchauffage est particulièrement important pour le soudage de pièces épaisses, de métaux à cœfficient de dilatation élevé ou dont la conductivité électrique est élevée.

Tous les métaux n'ont pas nécessairement besoin de préchauffage ou de chauffage en cours de soudure. Le tableau de la figure 5.14 identifie les métaux et les circonstances où le chauffage est souhaitable, voire essentiel.

Figure 5.14 Contrôle des températures recommandé pour différents types de métaux

Type de métal	Contrôle des températures recommandé
Acier doux ou allié	– En général, les pièces minces n'ont pas besoin de préchauffage, mais on l'applique pour les plaques épaisses (plus de 5 mm).
Acier semi-dur ou dur	– On préchauffe ce type d'acier pour assurer l'homogénéité de la structure interne.

Figure 5.14 Contrôle des températures recommandé pour différents types de métaux (suite)

Type de métal	Contrôle des températures recommandé
Acier inoxydable	– Les aciers inoxydables ferritiques doivent normalement être préchauffés à 148 °C. – Il est bon de les préchauffer et de les refroidir lentement pour éviter le durcissement au contact de l'air. – On garde les aciers austénitiques le plus froid possible et souvent, on les refroidit avec un linge trempé pour empêcher l'oxydation de la surface.
Aluminium et magnésium	– Préchauffage si la plaque a une épaisseur supérieure à 5 mm. – Préchauffage à 200 °C si l'alliage est non traitable à chaud; sinon, préchauffage à 260 °C. – Lorsque les pièces sont fixes, on procède au postchauffage pour éliminer les contraintes au retrait à l'extérieur de la zone de soudure, et ce, pour éviter que la partie froide de la pièce limite le retrait et provoque l'apparition de tensions internes.
Cuivre	– Plus la conductivité thermique de l'alliage est élevée, plus le préchauffage doit être important. Le cuivre pur doit être préchauffé si l'épaisseur de la pièce excède 5 mm. – Les laitons à faible teneur en zinc doivent être préchauffés pour éviter les fissures, tandis que les laitons à forte teneur en zinc peuvent être soudés sans préchauffage. – Le bronze cuproaluminium ne nécessite pas de préchauffage, sauf pour des pièces épaisses. Le bronze cupronickel se soude généralement sans préchauffage.
Nickel	– Le nickel ne requiert généralement pas de préchauffage.
Titane	– Le préchauffage n'est généralement pas nécessaire, mais peut être indiqué pour éliminer l'humidité dans le métal.

Contrôle de la température pendant le soudage

Plus la plaque est épaisse, plus il est important de maintenir un chauffage constant pendant tout le processus de soudage. On peut assurer le maintien de cette température à l'aide d'un chalumeau, d'un brûleur ou d'un dispositif électrique lorsque disponible.

Méthodes de traitement thermique après soudage

Les méthodes de traitement thermique après soudage incluent, le plus souvent, la normalisation et le recuit. On les utilise presque exclusivement pour l'acier.

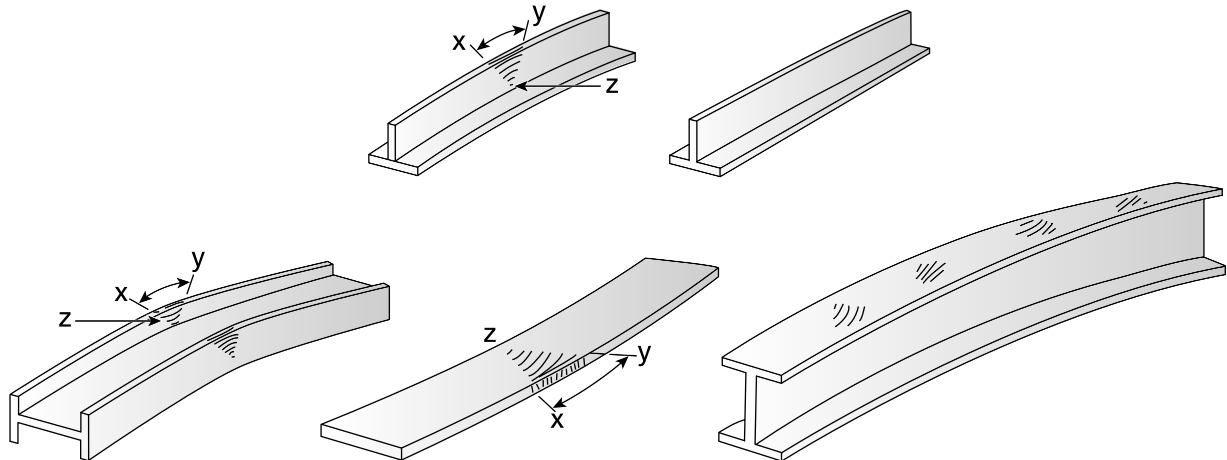
La normalisation est appliquée après un soudage qui a requis beaucoup de chaleur. C'est une technique de prévention qui vise à atténuer les tensions internes présentes dans le métal.

Le recuit est une technique de correction applicable lorsque la zone de soudure a subi un effet de trempe, généralement causé par un refroidissement trop rapide. En procédant au recuit, on parvient à renverser cet effet et à conserver les propriétés de soudure désirées.

Chaudes de retrait

Le procédé des chaudes de retrait peut permettre de redresser des pièces ou de corriger des déformations, notamment des déformations angulaires. Le procédé consiste à porter un endroit de la pièce au rouge vif afin que le métal se contracte au moment du refroidissement (figure 5.15). Un chauffage et un refroidissement rapide donnent de meilleurs résultats, car la chaleur reste plus localisée.

Figure 5.15 Correction des déformations par des chaudes de retrait



Les zones plus allongées (x-y) peuvent être réduites par l'application des chaudes de retrait permettant leur contraction.

Refroidissement

En général, la plupart des soudures peuvent refroidir à l'air libre, mais il faut les protéger des courants d'air. Lorsque les pièces sont plus épaisses ou que la soudure doit être de plus grande qualité, on peut recouvrir la pièce d'une toile pour ralentir le processus de refroidissement. Il faut être particulièrement prudent lors du refroidissement des structures ayant un rôle dynamique (c'est-à-dire soumises à des pressions d'utilisation, par exemple un pont roulant). Dans ces cas, le danger ne provient pas seulement des tensions internes créées dans la soudure, mais de celles présentes dans l'ensemble de la ZTA.

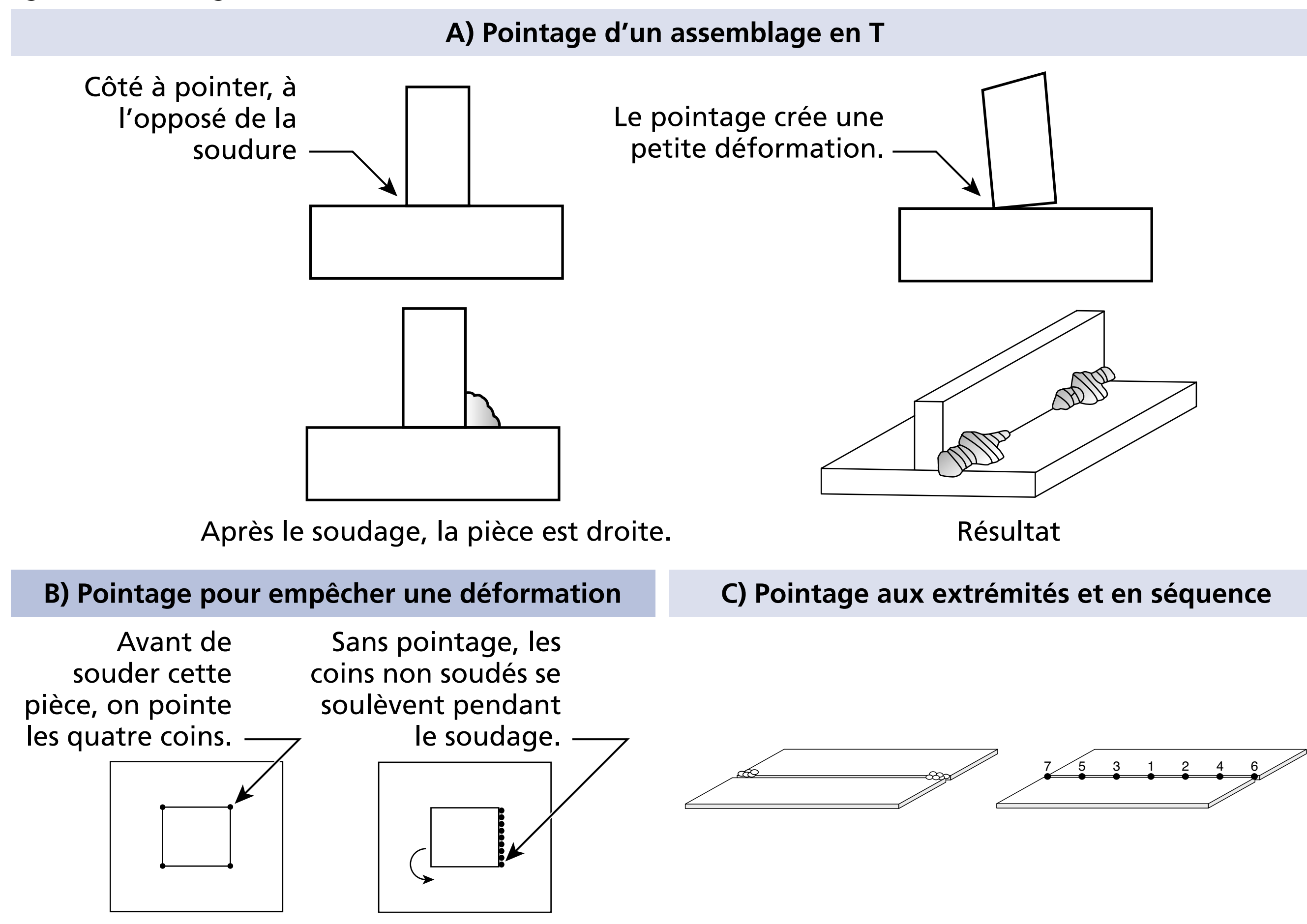
Méthodes de positionnement et de maintien

Les méthodes de positionnement et de maintien visent à limiter les possibilités de déformation de la pièce lors du soudage et du processus de refroidissement. Dans certains cas cependant, on crée une déformation préalable opposée à celle induite par le soudage, de façon que la pièce finie reprenne sa forme originale.

Pointage

Le pointage peut servir à créer une déformation préalable pour éviter une déformation finale (ex. : pointage d'un assemblage en T, partie A de la figure 5.16). Par ailleurs, il peut aussi être utilisé pour empêcher l'apparition d'une déformation (partie B). Enfin, le pointage sert également à assurer que les plaques ne se séparent pas (partie C).

Figure 5.16 Pointage



Bridage

Le bridage sert à maintenir la pièce en place, surtout pour un usinage à froid. Pour le soudage, on bride lorsque la déformation n'est pas possible et on suit généralement avec un recuit pour éliminer les tensions internes. En général, les pièces épaisses sont plus susceptibles de nécessiter un bridage.

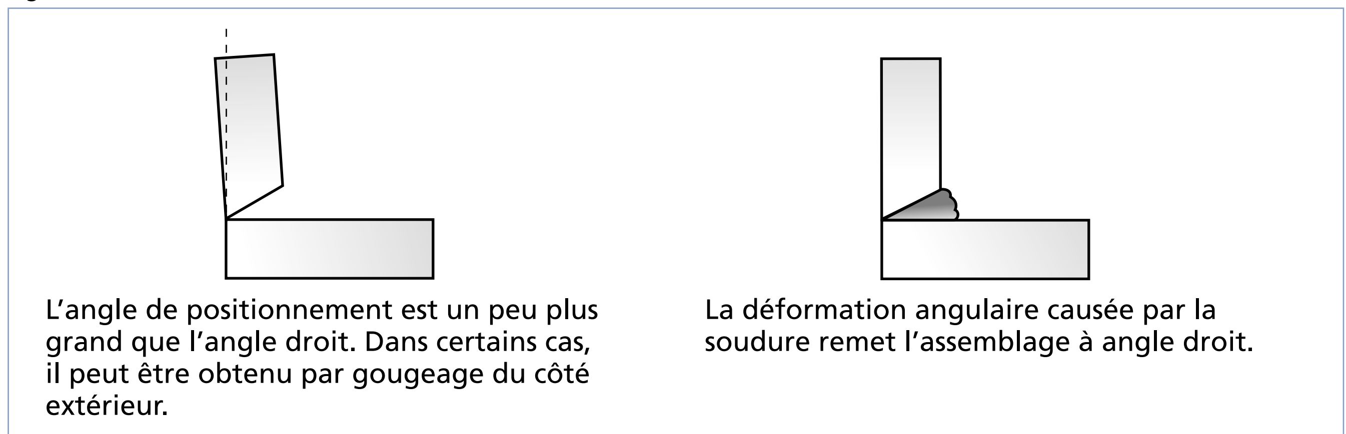
Les techniques de bridage incluent :
- l'emploi d'un dispositif de serrage (serre-joint, bride de serrage, etc.) ;
- le pointage rigide (points de soudure) ;
- peu ou pas d'espacement entre les bords ;
- un refroidissement entre les passes de soudage.

Prépliage ou déformation de positionnement

Le prépliage constitue une méthode mécanique courante pour éviter la déformation. En prévoyant la déformation causée par la soudure, on impose au départ une déformation inverse afin d'obtenir une pièce droite une fois le travail effectué. Par exemple, on positionnera une barre sur des blocs permettant une déformation naturelle, due à l'élasticité du métal, qui s'opposera à la déformation angulaire induite par la soudure.

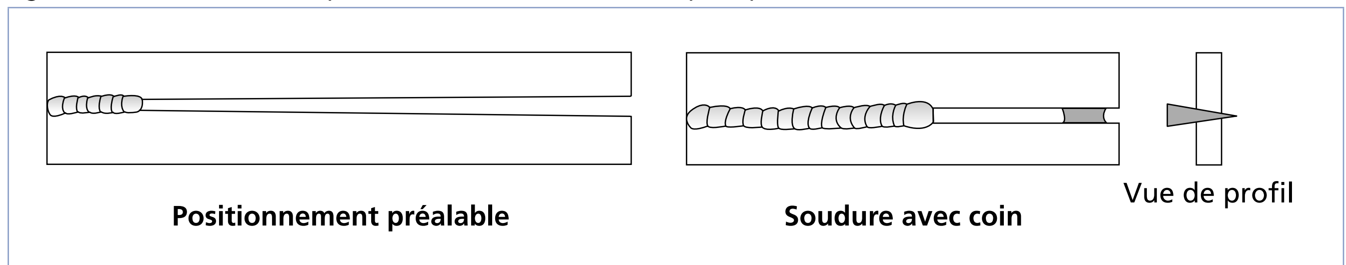
Les soudures en L peuvent être effectuées en positionnant les deux plaques à un angle légèrement obtus. La déformation angulaire créée par la soudure les redressera à angle droit (figure 5.17).

Figure 5.17 Soudure en L



Le retrait transversal peut aussi être prévenu en positionnant adéquatement les pièces (figure 5.18). L'écartement tourne généralement autour de 10 mm par mètre linéaire de soudure, mais peut varier en fonction de l'épaisseur des plaques et du type de métal à souder. On peut aussi assurer l'écartement en insérant un coin entre les plaques (figure 5.18) ; on enlève le coin lorsque le cordon de soudure se rapproche.

Figure 5.18 Positionnement préalable et insertion d'un coin pour prévenir le retrait transversal





Exercice 5.2

1. Cochez les avantages du préchauffage d'une pièce parmi les suivants.

   a) Ralentit la vitesse de refroidissement. ☐
   b) Augmente l'épaisseur de la soudure. ☐
   c) Permet d'évaporer l'eau contenue dans la pièce. ☐
   d) Réduit le temps de soudage. ☐
   e) Réduit la quantité de métal d'apport nécessaire. ☐
   f) Minimise les contraintes à la dilatation. ☐

2. Pourquoi est-il important de minimiser la quantité d'humidité dans une pièce ?

   a) Parce que le métal d'apport adhère mal lorsque la pièce est humide. ☐
   b) Parce que l'humidité fournit une source d'hydrogène qui favorise la fissuration à froid lorsqu'il est absorbé dans la soudure. ☐
   c) Parce qu'on ne peut pas amorcer l'arc sur une pièce humide. ☐

3. Quel est **le plus important** facteur déterminant si une pièce aura besoin d'être préchauffée ou non ?

   a) Sa longueur ☐
   b) Sa couleur ☐
   c) Sa température ☐
   d) Son épaisseur ☐
   e) Son élasticité ☐
   f) Sa malléabilité ☐

4. À quel métal les traitements thermiques après soudage sont-ils généralement appliqués ?

   a) Titane ☐
   b) Cuivre ☐
   c) Nickel ☐
   d) Aluminium ☐
   e) Acier ☐
   f) Magnésium ☐

5. Vrai ou faux ?

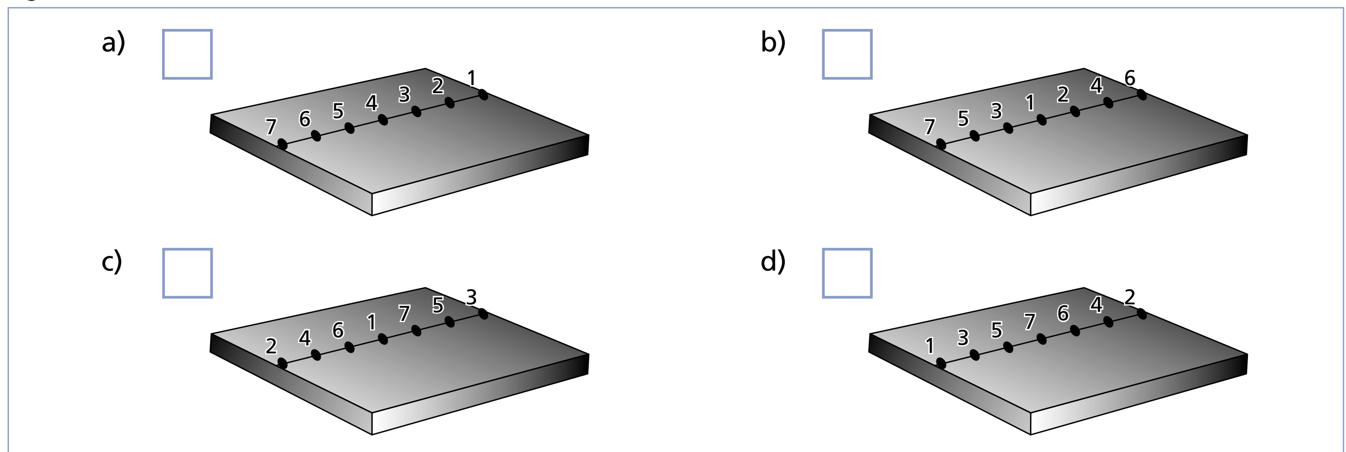
	Vrai	Faux
a) Une augmentation de la vitesse de soudage augmente les risques de déformation.	☐	☐
b) Une bonne préparation des joints permet de réduire les risques de déformation lors du soudage.	☐	☐
c) Le préchauffage constitue une méthode courante permettant de minimiser les déformations ; on l'applique particulièrement aux plaques épaisses.	☐	☐
d) Lors du soudage, il est recommandé de réduire au minimum le nombre de passes afin de minimiser les déformations angulaires.	☐	☐
e) Le bridage ne doit jamais être utilisé pour empêcher les déformations causées par le soudage.	☐	☐

6. Parmi les métaux suivants, lesquels ne requièrent généralement pas de préchauffage, quelle que soit l'épaisseur de la plaque ?

   a) Le magnésium ☐
   b) L'acier inoxydable ☐
   c) Le nickel ☐
   d) Le cuivre ☐
   e) L'acier ☐
   f) La fonte ☐

7. Identifiez la bonne séquence de pointage parmi celles présentées à la figure 5.19.

Figure 5.19



8. À quelle technique de maintien est généralement associé un traitement thermique, tel que la normalisation ou le recuit ?

   a) Le bridage ☐
   b) Le pointage ☐
   c) La déformation de positionnement préalable ☐

9. Dans quel sens doit-on effectuer la déformation préalable d'une pièce pour diminuer le plus possible les risques de déformation angulaire ?

   a) Dans le sens de la soudure ☐
   b) Dans le sens opposé à la soudure ☐
   c) Cela dépend des situations. ☐
   d) Du côté préchauffé ☐

10. Quels moyens, parmi les suivants, permettent d'atténuer le retrait transversal ?

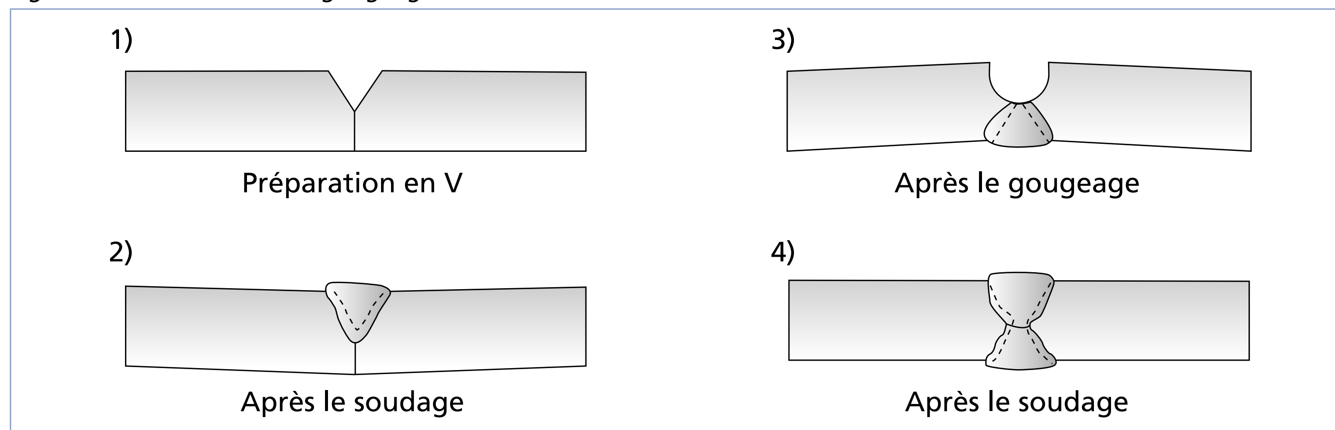
   a) Le pointage ☐
   b) Le préchauffage ☐
   c) L'écartement préalable des pièces ☐
   d) Une vitesse de soudure lente ☐
   e) L'insertion d'un coin à une extrémité du joint ☐

Optimisation de l'angle des chanfreins

Un angle de chanfrein trop grand accroît la possibilité de déformation angulaire des pièces (partie A de la figure 5.7).

On tente donc d'optimiser l'angle des chanfreins à un niveau adéquat pour éviter les déformations, tout en conservant un angle assez grand pour limiter l'apparition de fissures. Les chanfreins en double V permettent de minimiser la déformation angulaire des soudures bout à bout, et ils exigent moins de métal d'apport que les joints en V simple. Pour les plaques très épaisses, on choisit donc un chanfrein en double V ou des préparations en J ou en U, plutôt qu'un chanfrein en V trop large. Enfin, on soude un chanfrein en V moins large et moins profond pour gouger et souder ensuite à l'envers (figure 5.20).

Figure 5.20 Joint en V avec gougeage et soudure à l'envers



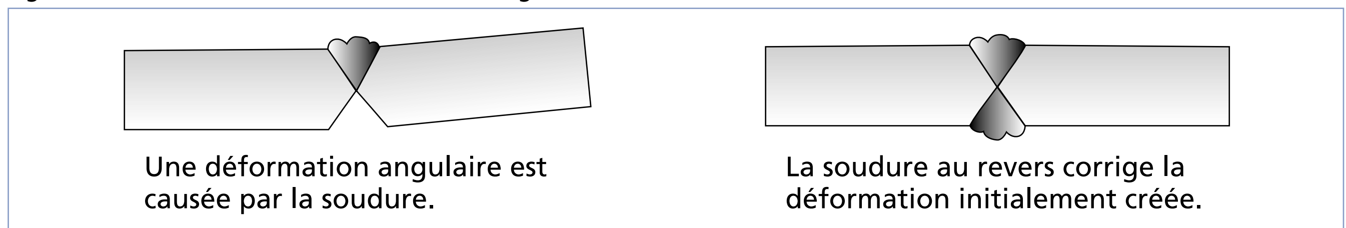
Procédure de soudage

Hormis son utilisation pour provoquer une déformation préalable, la séquence de soudage sur une soudure bout à bout permet de conserver l'écartement des pièces en limitant le surchauffage local de la pièce. Ainsi, pour éviter un chauffage trop important, on soude par étapes le long du joint plutôt que de souder d'un bout à l'autre. Cela permet d'éviter les déformations, en plus de minimiser les tensions internes créées par le soudage.

Séquence de soudage

Certaines techniques de soudage créent une déformation préalable qu'elles corrigent subséquemment. C'est le cas des soudures pleine pénétration (figure 5.21). La soudure d'un côté de la plaque cause une déformation angulaire, tandis que la soudure suivante, de l'autre côté, corrige la déformation.

Figure 5.21 Correction d'une déformation angulaire

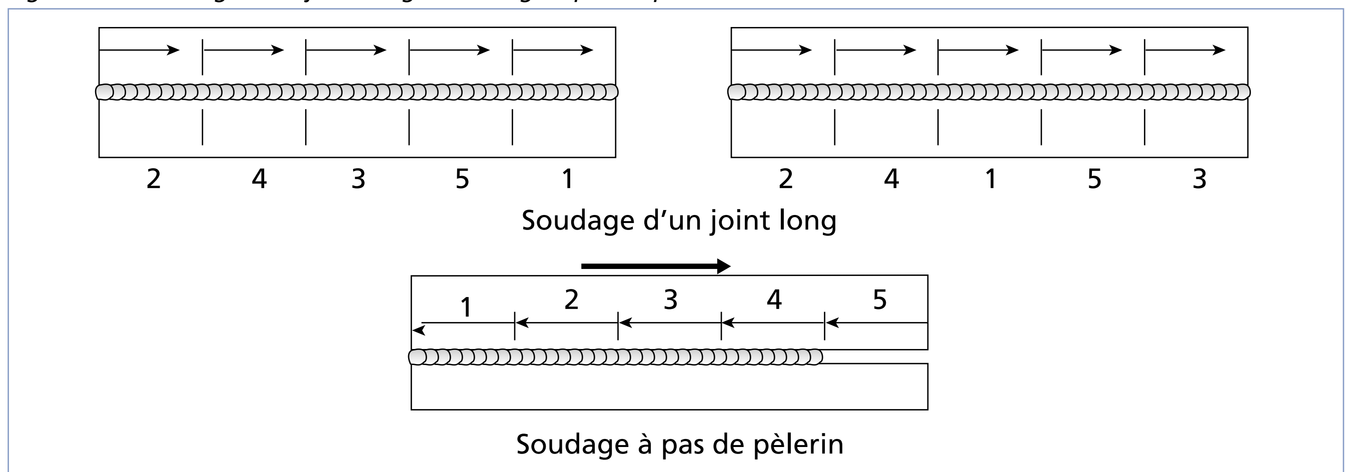


Il est bon de se rappeler que la soudure multipasse, d'un seul côté du joint, a tendance à amplifier les déformations angulaires tout en diminuant les déformations longitudinales.

L'application de plusieurs petites passes de soudure permet de ralentir la vitesse de refroidissement globale du métal. Chaque passe a comme résultat de maintenir la chaleur de la passe précédente et permet de rendre la structure plus homogène.

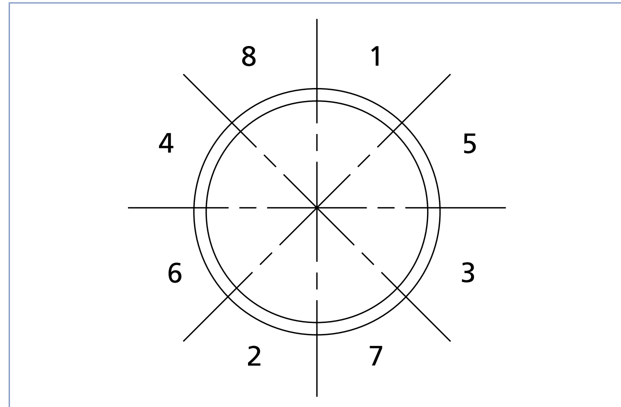
Par ailleurs, lors du soudage d'un joint long, on utilise préférablement une séquence de soudage qui commence par les extrémités, puis la zone du milieu, pour finir par les intervalles ou par la zone du milieu, les extrémités, puis les intervalles. Il s'agit des méthodes les plus efficaces, dont les procédures sont illustrées en cinq étapes à la figure 5.22 (selon la longueur du joint, on pourrait avoir sept étapes ou plus). Si le joint est assez court, on peut utiliser la méthode du pas de pèlerin (ou soudage à rebours – figure 5.22).

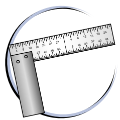
Figure 5.22 Soudage d'un joint long et soudage à pas de pèlerin



Une bonne séquence de soudage d'un tuyau, d'un cylindre ou de toute autre pièce circulaire implique le soudage de régions vis-à-vis l'une de l'autre (figure 5.23).

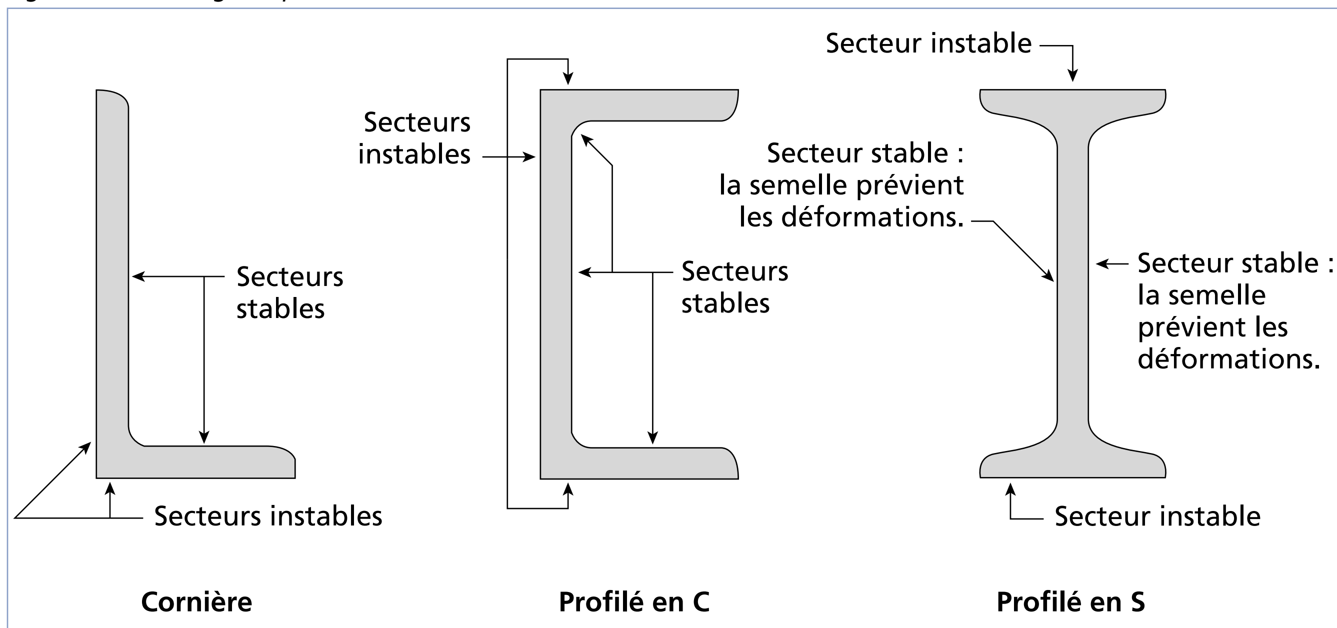
Figure 5.23 Séquence de soudage d'un cylindre





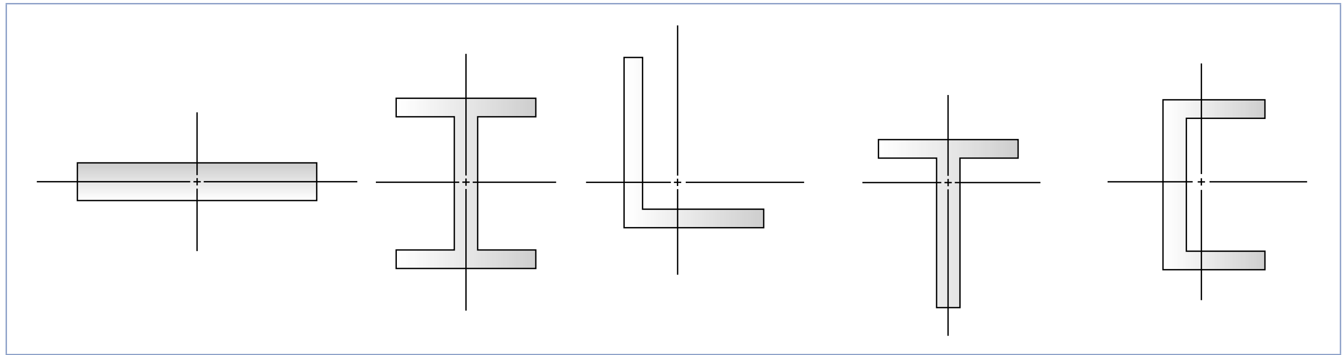
Dans le cas des profilés, on commence toujours la soudure à l'intérieur pour profiter des contraintes naturelles fournies par les appuis du profilé (figure 5.24).

Figure 5.24 Soudage de profilés



De plus, pour le soudage de profilés, on peut tirer profit des axes neutres, où les tensions dans la pièce sont égales et opposées, pour souder de façon à minimiser les déformations (figure 5.25).

Figure 5.25 Axes neutres de différents profilés



Il existe plusieurs critères à considérer lors de l'élaboration d'une procédure de soudage. Une bonne procédure doit tenir compte de l'assemblage et de la méthode de soudage utilisée, et doit comprendre :

- une préparation des joints appropriée ;
- une séquence de soudage adaptée aux dimensions et à l'épaisseur de la pièce ;
- le respect des dimensions et des tolérances de montage ;
- une réduction du nombre de passes pour diminuer les déformations angulaires et transversales ;
- une vitesse de soudage aussi rapide que possible (une vitesse rapide évite un surchauffage local et minimise les déformations) ;
- un préchauffage préalable approprié.

Il est essentiel de demeurer vigilant pendant le processus de soudage afin d'être en mesure, par l'observation de son travail, de réagir en modifiant la séquence pour éviter que les déformations ne surviennent.



Exercice 5.3

1. Dans la figure 5.26, identifiez le type de déformation que la méthode ou la préparation indiquée vise à éviter.

Figure 5.26

Méthode ou préparation		Types de déformation à éviter
a)	☐	1. Retrait transversal
b) Insertion d'un coin à l'extrémité d'un joint long entre des plaques	☐	2. Retrait longitudinal
c) Soudure multipasse	☐	3. Déformation angulaire
d) Positionnement préalable de la pièce dans le sens opposé à la soudure	☐	
e) 4 3 2 1 Amorce Fin	☐	

2. Parmi les facteurs suivants, lesquels doivent être pris en considération lors de l'élaboration d'une procédure de soudage ?

   a) La séquence de soudage ☐
   b) Le niveau de préchauffage requis ☐
   c) Les dimensions de soudures requises et les tolérances ☐
   d) La température de fusion ☐
   e) La préparation des joints ☐
   f) La température de l'arc ☐

Résumé

- Les déformations d'une pièce peuvent être causées par des procédés thermiques ou mécaniques.
- Les déformations thermiques résultent du processus de dilatation/retrait de la pièce qui est chauffée puis refroidie. En général, il existe toujours des contraintes à la dilatation, notamment le métal froid entourant la zone de soudage. C'est pourquoi une des méthodes les plus efficaces pour éviter ces déformations consiste au préchauffage des pièces. Il faut aussi refroidir plus lentement les pièces épaisses.
- Les méthodes de positionnement et de maintien préviennent les déformations en minimisant les possibilités de dilatation ou en créant des déformations opposées. Parmi les méthodes courantes de positionnement, on compte le pointage, le bridage et les techniques de déformations préalables.
- L'angle des chanfreins influe aussi sur la possibilité de déformation ; c'est pourquoi un bon chanfrein ne doit pas être trop grand.
- Finalement, il est important de prévoir une séquence de soudage appropriée pour s'assurer que les déformations ne s'amplifient pas, mais qu'elles s'annulent les unes les autres.
- Dans l'application des méthodes pour contrer les déformations, il existe une part d'information et une part d'expérience acquise, laquelle permet au soudeur, à la longue, de prévoir le résultat de ses actions.

Notes

Notes

Chapitre 6

DÉFAUTS DE SOUDURE

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé. Commençons d'abord par les fissurations.

Fissurations

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé. L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait peuvent être à l'origine des fissures. Le bon choix du métal d'apport, un préchauffage approprié, une bonne préparation des joints et la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc prévenir les fissures.

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

– Les fissures peuvent être localisées dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
– Les fissures peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : la fissuration à chaud et la fissuration à froid.

Le tableau de la figure 6.1 présente les causes les plus fréquentes de fissurations à chaud et à froid, et les moyens de les prévenir.

Figure 6.1 Causes et moyens de prévention liés à la fissuration

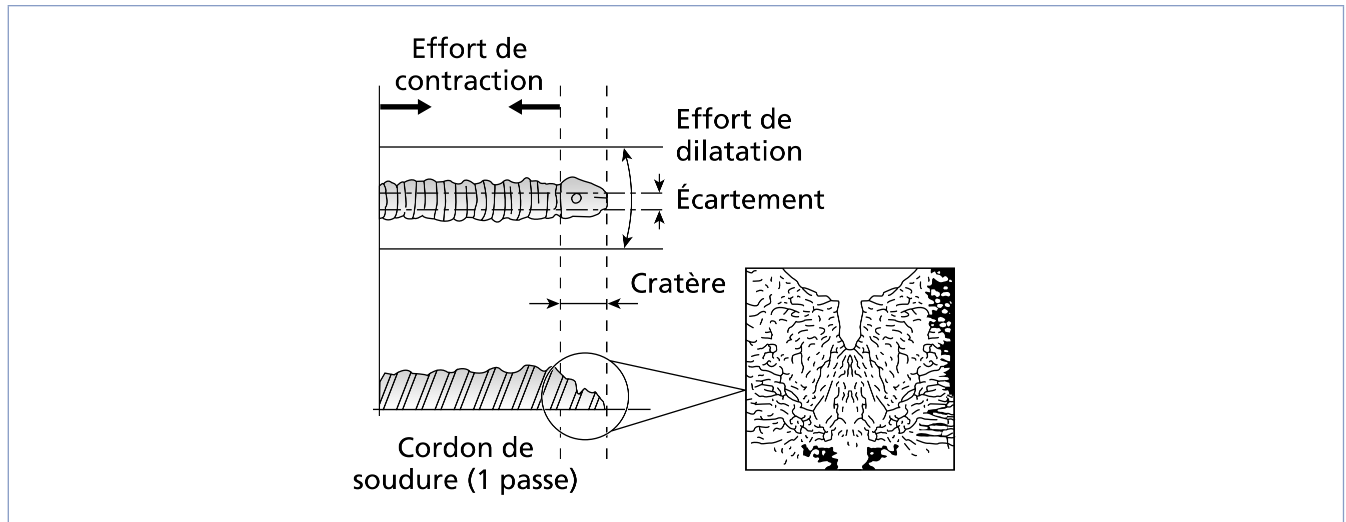
	Causes	Moyens de prévention
Fissuration à chaud	– Joints trop étroits – Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore) – Métal d'apport incompatible avec le métal de base – Cordon trop petit – Trop de retrait durant ou après le soudage	– Bonne mesure des angles des chanfreins – Préchauffage et chauffage en cours de soudure – Bon choix du métal d'apport – Refroidissement lent – Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) – Cordon suffisamment large, réduction de la vitesse au besoin – En cas de retrait, léger retour en arrière et ajustement de la procédure de soudage
Fissuration à froid	– Hydrogène coincé dans la soudure – Tensions internes résiduelles importantes	– Préchauffage et chauffage en cours de soudure – Refroidissement lent – Utilisation d'électrodes basiques – Entreposage des électrodes dans un four, au chaud – Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) – Dessoudage (au besoin)

Fissuration à chaud

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Si on doit souder un métal à risque, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique. Par ailleurs, le métal d'apport doit être compatible avec le métal de base et le cordon de soudure doit être suffisamment large.

Dans d'autres cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure (figure 6.2). On peut prévenir ces fissures en effectuant un léger retour en arrière avec l'électrode, mais aussi en préchauffant le métal, en diminuant l'écartement entre les pièces ou en nourrissant le cratère par un apport plus important de métal.

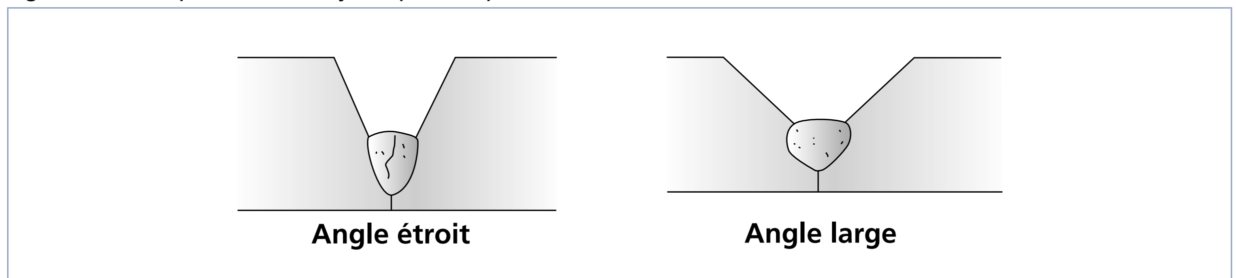
Figure 6.2 Fissure de cratère





La préparation des joints joue un rôle majeur dans la prévention de la fissuration à chaud, car des joints trop étroits et plus profonds favorisent son apparition, tandis que des joints plus larges et de moindre profondeur en diminuent les risques (figure 6.3).

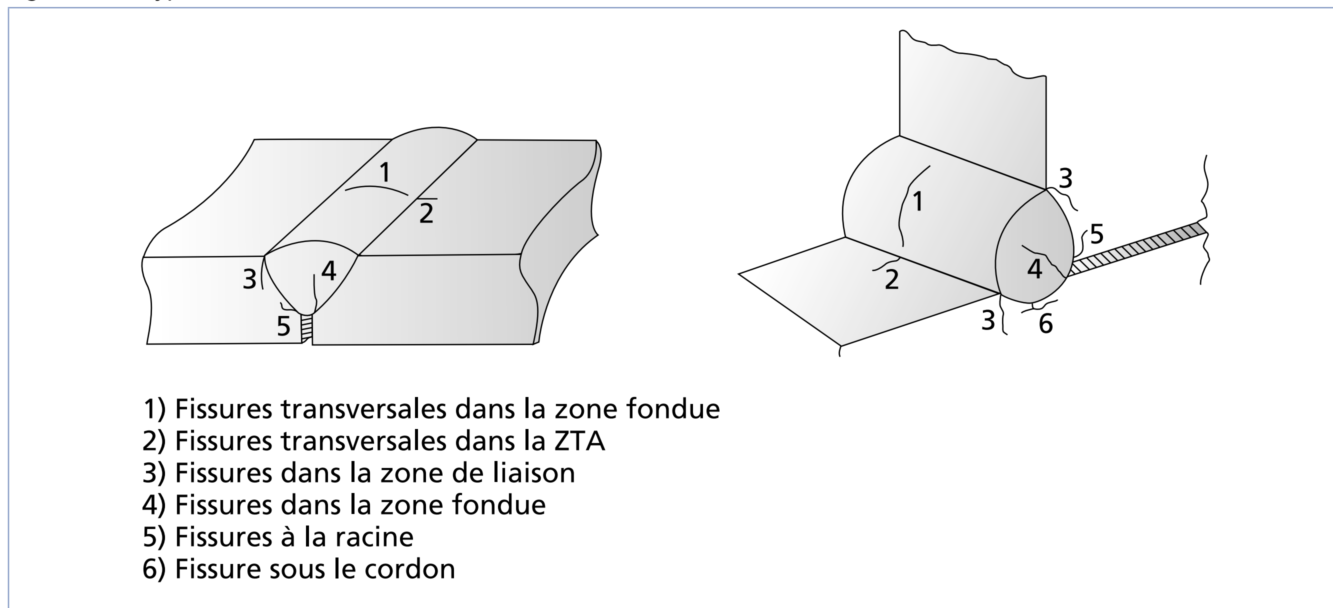
Figure 6.3 Préparation d'un joint pour la prévention de la fissuration à chaud



Fissuration à froid

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZTA (figure 6.4) et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid.

Figure 6.4 Types de fissures à froid



Plusieurs facteurs influent sur la vulnérabilité d'une pièce à la fissuration à froid, dont les suivants :

- la trempabilité reliée au carbone équivalent ;
- la présence d'hydrogène due à l'humidité sur l'enrobage ou sur la pièce ou à certains composés comme la rouille et la calamine ;
- l'humidité dans l'air ;
- le refroidissement rapide de la pièce ;
- la présence de défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, trop grande épaisseur de la soudure, caniveau, etc.).

La meilleure prévention de la fissuration à froid est un préchauffage approprié des pièces à souder afin d'évaporer l'hydrogène contenu dans l'humidité présente sur la pièce (le préchauffage doit atteindre au moins 100 °C, soit la température d'ébullition de l'eau). On peut aussi choisir des électrodes préchauffées à basse teneur en hydrogène (basiques). On prend soin de refroidir les pièces susceptibles de fissuration à froid très lentement pour éviter l'apparition de tensions internes favorisant l'apparition de fissures.



Exercice 6.1

1. Quels sont les principaux moyens pour prévenir la fissuration ?

   ____

   ____

   ____

2. Quelles sont les principales impuretés présentes dans l'acier qui risquent de causer la fissuration à chaud ?

   a) Le phosphore ☐
   b) Le manganèse ☐
   c) Le nickel ☐
   d) Le soufre ☐
   e) Le molybdène ☐

3. Vrai ou faux ?

	Vrai	**Faux**
a) Il est essentiel d'utiliser un métal d'apport compatible avec le métal de base pour prévenir la fissuration.	☐	☐
b) Il faut garder le cordon de soudure le plus étroit possible.	☐	☐
c) Des joints plus larges aident à prévenir la fissuration à chaud.	☐	☐
d) À la fin de la soudure, il faut relever l'électrode le plus rapidement possible.	☐	☐
e) Lors du soudage d'un métal à forte teneur en soufre ou en phosphore, il est recommandé d'utiliser une électrode basique.	☐	☐

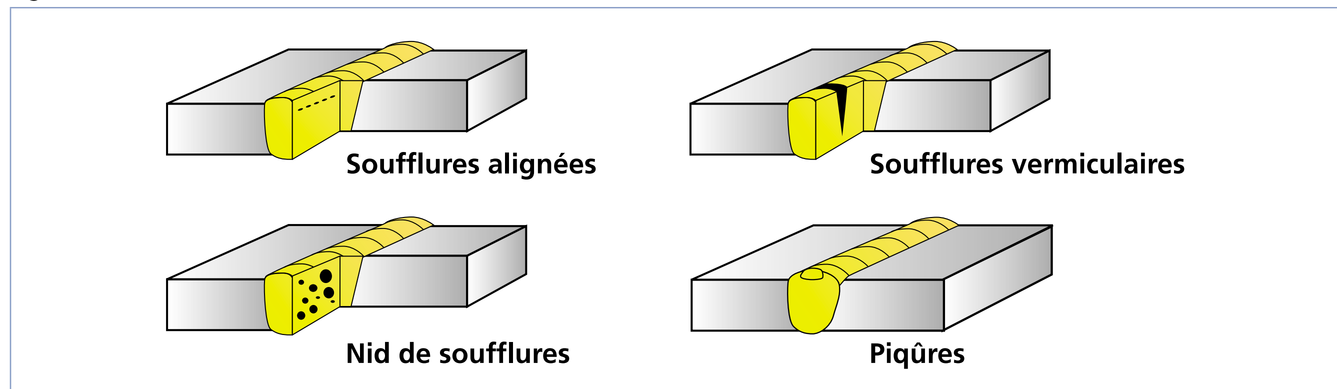
Défauts communs et causes

Cette section présente les défauts de soudure les plus courants, ce qui les cause et comment on peut les prévenir.

Soufflures

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz (figure 6.5). Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchantes (en surface).

Figure 6.5 Soufflures



Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance graisseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

Pour prévenir les soufflures, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures. Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

Pollution ferreuse

La pollution ferreuse est une corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche superficielle. Elle résulte généralement de l'utilisation d'outils qui ne sont pas en acier inoxydable (brosse ou autres) pendant l'usinage, la mise en forme ou le nettoyage. Dans d'autres cas, elle survient en conséquence des projections de métal fondu lors des opérations de soudage.

Inclusions

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger (figure 6.6). On distingue différents types d'inclusions à la figure 6.7.

Figure 6.6 Inclusions

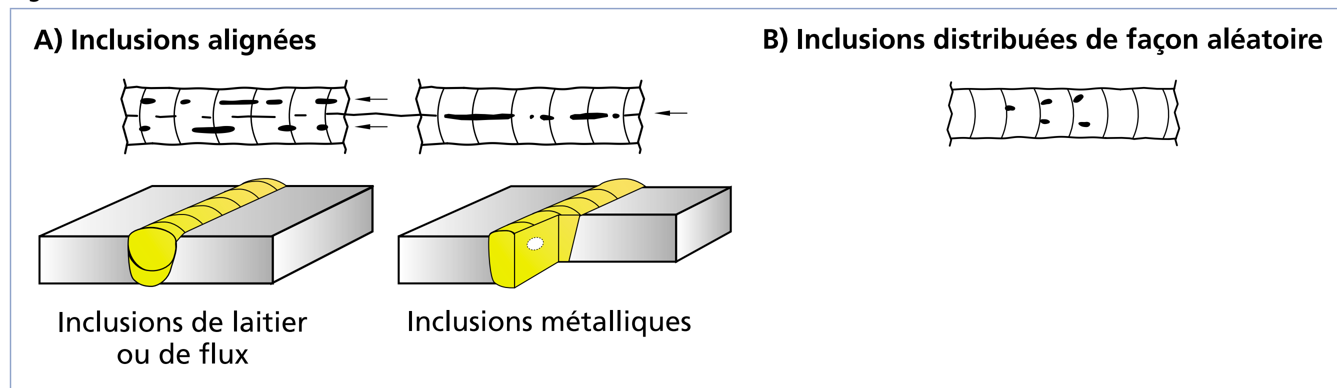


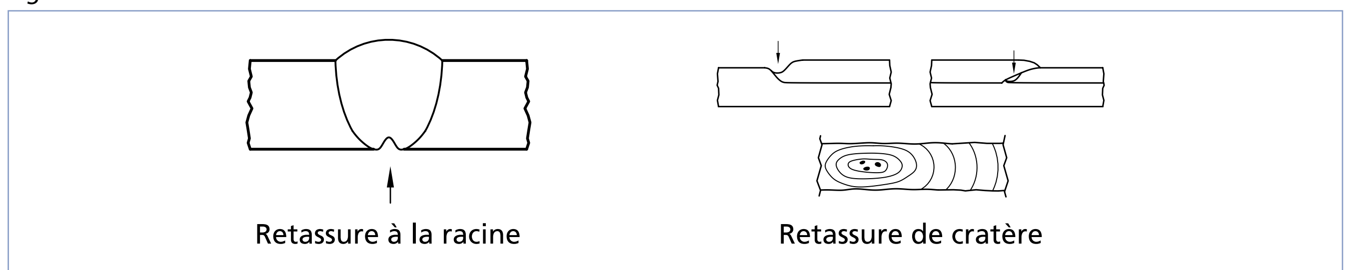
Figure 6.7 Types d'inclusions

Type d'inclusion	Description
Inclusion solide	Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (ex. : poussières)
Inclusion de laitier	Résidu de laitier emprisonné dans le métal fondu Les inclusions de laitier peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
Inclusion de flux	Résidu de flux emprisonné dans la soudure Les inclusions de flux peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
Inclusion d'oxyde	Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification
Inclusion métallique	Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (ex. : le tungstène lors du soudage GTAW, le cuivre et tout autre métal étranger)

Retassures et criques de solidification

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon (figure 6.8). Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une **retassure à la racine** apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une **retassure de cratère** est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante.

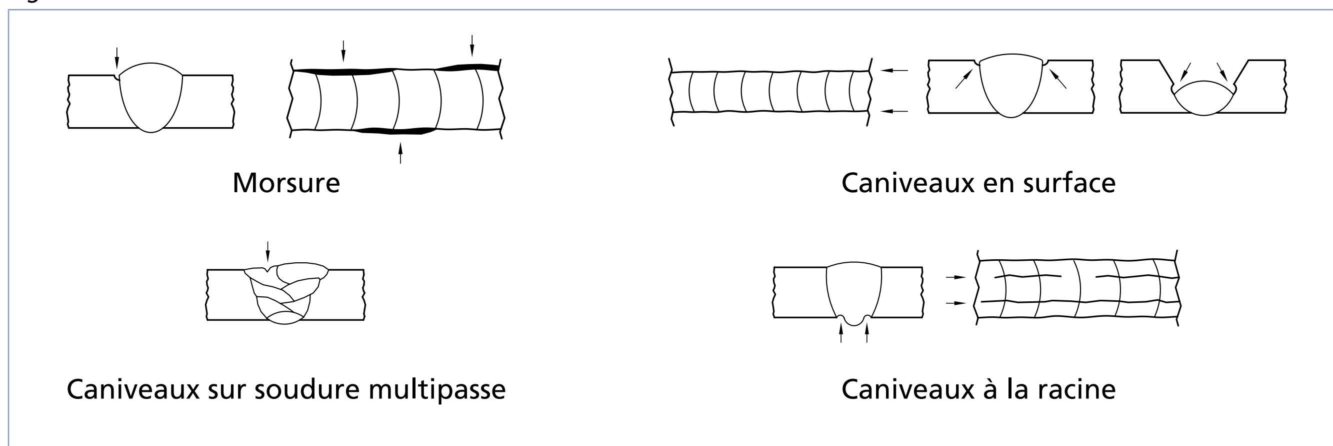
Figure 6.8 Retassures



Morsures et caniveaux

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base (figure 6.9). Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut.

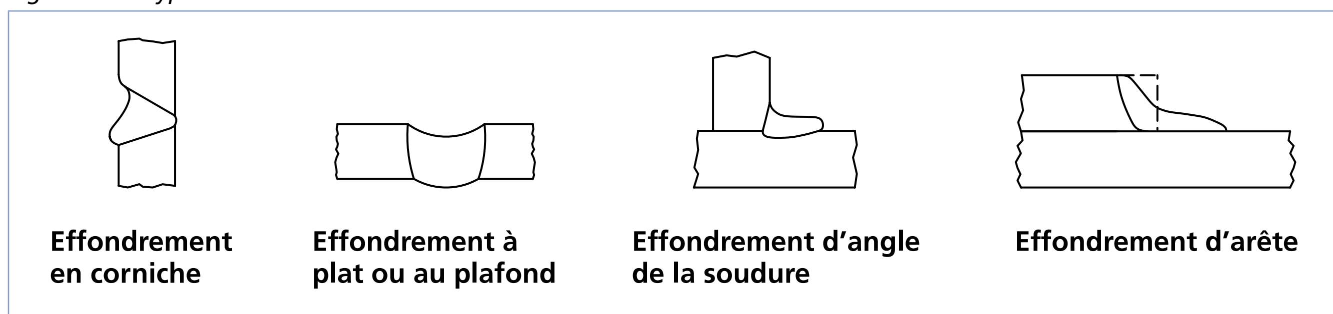
Figure 6.9 Morsures et caniveaux



Effondrements et trous

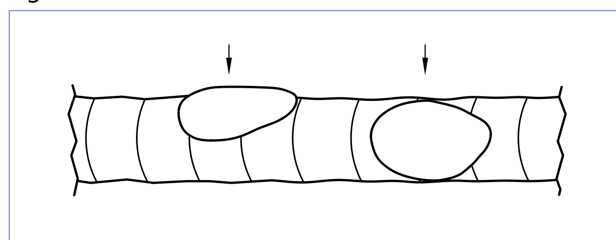
L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements (figure 6.10).

Figure 6.10 Types d'effondrements



Lorsque l'effondrement du bain de fusion entraîne la perforation de la soudure, on parle alors de trou (figure 6.11). Une soudure effectuée trop lentement (vitesse d'avance trop faible) risque de causer un effondrement. Si on travaille avec des plaques minces, le courant ne doit pas être trop fort.

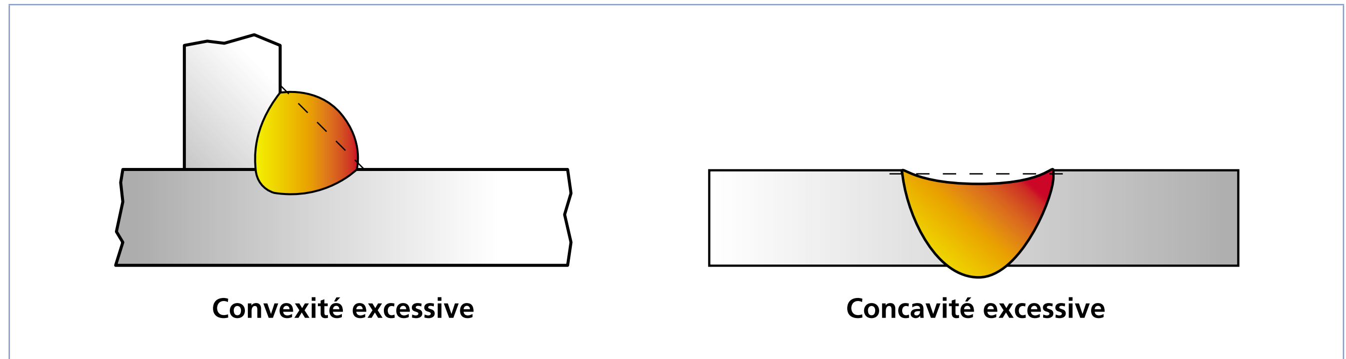
Figure 6.11 Trou



Défauts géométriques du cordon

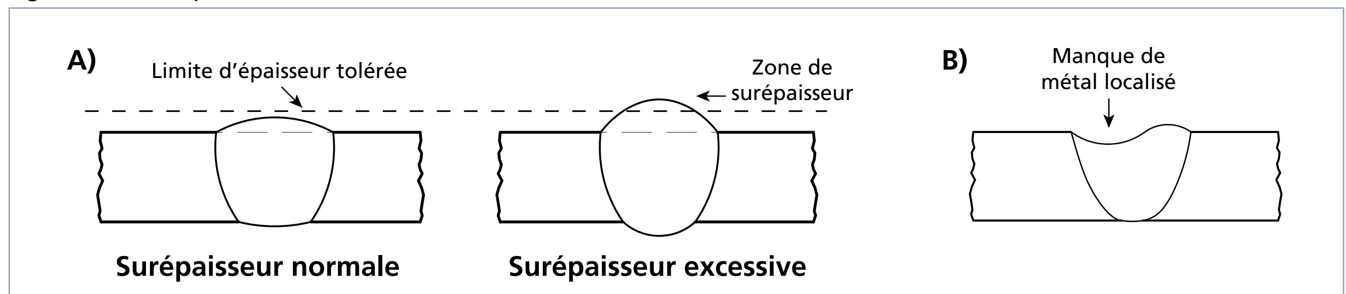
Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être trop convexe ou trop concave (figure 6.12).

Figure 6.12 Convexité et concavité



Aussi, une surépaisseur excessive du cordon survient lorsqu'il y a trop de métal déposé sur le cordon au cours des dernières passes et que l'épaisseur du cordon dépasse les normes tolérées (partie A de la figure 6.13). Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du cordon ; ce manque peut être localisé (partie B) ou continu.

Figure 6.13 Surépaisseur



L'angle du raccordement du cordon, pour les cordons convexes, ne doit jamais excéder 30° (figure 6.14). Un manque de mouillage du cordon peut entraîner un angle de raccordement trop élevé.

Le tableau de la figure 6.15 résume les causes associées aux défauts d'un cordon de soudure ainsi que les moyens de les prévenir.

Figure 6.14 Mouillage d'un cordon de soudure

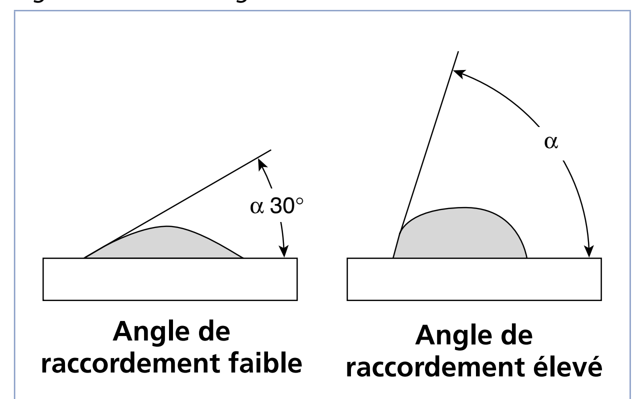


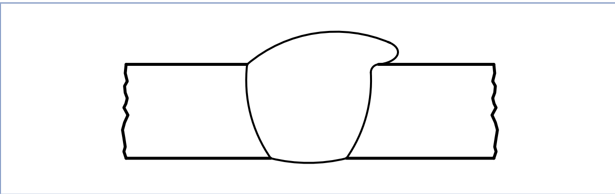
Figure 6.15 Défauts d'un cordon de soudure

Aspect du cordon	Causes possibles	Moyens de prévention
Trop large	– Vitesse d'avance trop lente – Mauvais angle de soudure – Arc trop long	– Augmenter la vitesse. – Corriger l'angle. – Rapprocher la torche (ou l'électrode).
Trop étroit	– Vitesse d'avance trop rapide	– Diminuer la vitesse.
Irrégulier	– Intensité du courant trop faible – Mauvais angle de soudure – Arc irrégulier – Mouvements du soudeur non stables	– Augmenter l'intensité. – Corriger l'angle. – Vérifier que le métal de base et l'électrode sont propres, que l'électrode est appropriée, que le courant est constant, que la haute fréquence fonctionne et qu'il n'y a pas de matériel magnétique près de l'arc. – S'assurer que la vitesse d'avance et la longueur d'arc sont stables et ne varient pas.

Débordements du cordon

Il s'agit d'un excès de métal déposé à la surface du métal de base, mais qui ne se lie pas avec ce dernier (figure 6.16).

Figure 6.16 Débordement



Défauts de pénétration

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multipasse, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé (figure 6.17).

Un manque de pénétration constitue une absence partielle de fusion des bords à souder qui laisse un espace entre ceux-ci (figure 6.17). Le manque de pénétration constitue souvent une conséquence d'un courant trop faible ou d'une vitesse d'avance trop élevée. Il est aussi possible que le chanfrein soit trop étroit ou absent, ou que l'arc soit trop long. Dans le cas de pièces épaisses, un préchauffage insuffisant peut aussi être à l'origine d'un manque de pénétration de la soudure.

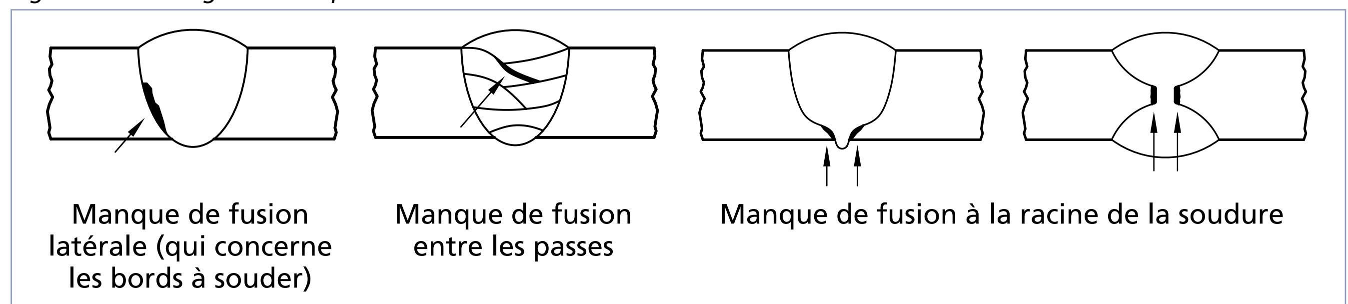
Figure 6.17 Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention

Défaut de pénétration	Causes possibles	Moyens de prévention
Excès de pénétration	– Vitesse d'avance trop lente – Intensité du courant trop forte – Mauvaise préparation des bords – Trop de distance entre les pièces – Arc trop court	– Augmenter la vitesse. – Diminuer l'intensité. – Utiliser le joint approprié. – Rapprocher les pièces. – Éloigner la torche.
Manque de pénétration	– Vitesse d'avance trop élevée – Intensité du courant trop faible – Chanfrein trop étroit ou absent – Métal de base trop épais et froid	– Diminuer la vitesse. – Augmenter l'intensité. – Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces. – S'assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée.

Collage ou manque de fusion

Dans ce cas, le métal de base est non fondu, ce qui crée un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base. Le manque de fusion diminue la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes ou à la racine de la soudure (figure 6.18). Ce type de problème risque de survenir si le courant de soudage est trop faible ou si la vitesse est trop grande. Un bon préchauffage des pièces épaisses permet de prévenir ce défaut. Aussi, il peut être très difficile à repérer même avec les rayons X puisqu'il n'a que deux dimensions. On le retrouve plus fréquemment avec le procédé GMAW. Pour éviter ce problème, on doit s'assurer de la bonne procédure de soudage et effectuer des tests destructifs.

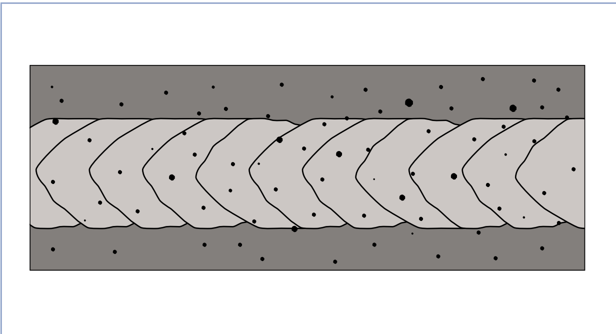
Figure 6.18 Collage ou manque de fusion



Projections

Une projection est une éclaboussure de métal en fusion projeté pendant le soudage et qui adhère au métal de base (figure 6.19) ou au cordon déjà solidifié. Les projections peuvent être causées par un courant trop fort, un arc trop long ou le soufflage de l'arc. Un mauvais débit et certains gaz de protection peuvent aussi favoriser l'apparition de projections.

Figure 6.19 Projections



Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs. Cependant, la plupart d'entre eux peuvent être évités si on modifie les paramètres appropriés en cours de soudage (figure 6.20).

Figure 6.20 Défauts de soudage et correctifs

Défauts	Correctifs				
	Intensité	Tension	Vitesse d'avance	Longueur terminale	Angle de traînée
Soufflures	5 ↑	1 ↓	4 ↓	2 ↑	3 ↑
Projections	4 ↓ *	1 ↑	5 ↓	3 ↓	2 ↓
Convexité	4 ↓	1 ↑	5 ↓	2 ↓	3 ↓
Soufflage	4 ↓	3 ↓	5 ↓	2 ↑	1 ↑
Pénétration insuffisante	2 ↑	3 ↓	4 ↑	1 ↓	5 ↓
Manque de continuité du bain	4 ↑	1 ↓	5 ↓	2 ↑	3 ↓
Collage de l'électrode	4 ↓	1 ↑	5 ↓	3 ↓	2 ↑

Note : Les chiffres indiquent l'ordre dans lequel on devrait envisager les correctifs énumérés.

↑ : Augmenter

↓ : Diminuer

* Avec certains fils-électrodes, la taille des gouttelettes diminue quand le courant augmente, ce qui diminue les projections.

Le tableau de la figure 6.21 présente les défauts communs en fonction du métal soudé de même que les principaux moyens de les prévenir. Quant au tableau de la figure 6.22, il présente les principaux défauts en fonction du procédé de soudage utilisé.

Figure 6.21 Défauts communs par métal et moyens de prévention

Métal	Défauts communs	Moyens de prévention
Acier	– Fissuration à chaud (inclusion de contaminant dans le bain de fusion) – Fissuration à froid (hydrogène coincé dans la soudure) – Soufflures	– Technique de soudage : éliminer la présence d'impuretés à la surface du métal de base (soufre, phosphore). – Composition de l'acier : bien assécher en préchauffant.
Acier inoxydable	– Précipitations de carbure de chrome	– Utiliser un alliage à faible taux de carbone ou contenant des agents stabilisants (ex. : titane). – Utiliser un alliage à forte teneur en chrome ou en nickel, ou les deux. – Éviter de maintenir la pièce à des températures variant entre 425 et 814 °C.
Fonte	– Fissures à chaud	– Préchauffer et procéder à un refroidissement lent.
Aluminium	– Soufflures – Fissuration – Imperfection de la soudure (irrégulière ou peu profonde)	– Nettoyer pour éliminer la couche d'alumine en surface. – Effectuer un préchauffage et un postchauffage.
Titane	– Contamination du bain de fusion : • soufflures (contamination par des produits lubrifiants) • fragilité (contamination par de l'oxygène ou de l'hydrogène) • fissuration (contamination par des saletés)	– Utiliser un procédé avec protection gazeuse.

Figure 6.22 Défauts les plus fréquemment rencontrés en fonction du procédé utilisé

Procédé	Défauts communs
SMAW	– Aspect du cordon – Mauvaise reprise (cratère de reprise) – Défauts de pénétration (manque de pénétration surtout) – Inclusions de laitier
GTAW	– Fissures – Cavités – Inclusions de tungstène – Manque de fusion ou de pénétration – Défauts de formes du cordon – Oxydation en surface
GMAW	– Soufflures – Collage – Manque de pénétration – Projections – Joints irréguliers – Convexité excessive
FCAW/MCAW	– Soufflures – Projections – Caniveaux – Inclusions de laitier

Le tableau de la figure 6.23 reprend certains défauts communs et y présente en plus les moyens de les éviter.

Figure 6.23 Défauts de soudage, causes et moyens de prévention

Défauts	Causes	Moyens de prévention
Soufflures	– Emprisonnement de gaz dans la soudure – Présence d'huile à la surface du métal de base ou du métal d'apport – Courant de soudage trop faible ou vitesse trop élevée – Trop grand écartement à la racine	– Bien assécher le métal et protéger le bain de fusion. – Nettoyer le métal avec un solvant. – Augmenter l'intensité, réduire la vitesse d'avance ou préchauffer la zone de soudure. – Bien positionner les pièces.
Caniveaux	– Mauvais angle de la torche – Courant trop élevé – Longueur d'arc incorrecte	– Corriger l'angle. – Diminuer l'intensité du courant. – Corriger la longueur de l'arc.



Figure 6.23 Défauts de soudage, causes et moyens de prévention (suite)

Défauts	Causes	Moyens de prévention
Projections	– Instabilité de l'arc – Mode de transfert inapproprié – Courant trop intense – Soufflage de l'arc	– Changer le mélange de gaz de protection. – Changer la longueur de l'arc. – Changer le mode de transfert. – Réduire l'intensité du courant. – Choisir le courant approprié. – Changer la prise de masse.
Mauvaise fusion des bords	– Courant de soudage trop faible – Vitesse de soudage trop grande	– Augmenter l'intensité du courant. – Réduire la vitesse d'avance et préchauffer les pièces épaisses. – Effectuer un bon mouvement oscillatoire. – Bien disposer les cordons dans les soudures multipasses.
Inclusions solides, de flux ou de laitier	– Mauvais écartement à la racine – Impuretés dans le bain de fusion	– Bien positionner les pièces. – Bien nettoyer le métal, surtout entre les cordons. – Avoir une bonne chaleur de soudage. – Effectuer un bon mouvement oscillatoire. – Bien disposer les cordons dans les soudures multipasses.
Inclusions de tungstène	– Fonte de l'électrode causée par une chaleur trop élevée – Électrode en contact avec le bain de fusion	– Réduire l'intensité de courant. – Bien choisir les paramètres de soudage (diamètre de l'électrode et polarité du courant). – Maintenir l'arc de soudage suffisamment long.
Convexité excessive ou surépaisseur du cordon	– Chaleur trop faible – Vitesse de dévidage trop élevée	– Augmenter l'intensité du courant. – Réduire la vitesse de dévidage. – Effectuer un bon mouvement oscillatoire.
Effondrements ou concavité excessive	– Vitesse de soudage trop lente – Chaleur trop élevée	– Augmenter la vitesse. – Réduire l'intensité du courant. – Effectuer un bon mouvement oscillatoire.



Figure 6.23 Défauts de soudage, causes et moyens de prévention (suite)

Défauts	Causes	Moyens de prévention
Mauvais angle de raccordement	– Chaleur trop faible – Vitesse de dévidage trop élevée – Mauvais mouillage du cordon	– Augmenter l'intensité du courant. – Réduire la vitesse de dévidage. – Bien choisir le mélange de gaz actif ou l'hélium. – Effectuer un bon mouvement oscillatoire.
Débordement du cordon	– Vitesse d'avance trop lente – Mauvais angle de soudage – Joints mal nettoyés	– Augmenter la vitesse. – Modifier l'angle de soudage. – S'assurer que les joints sont propres.
Retassures	– Joints trop étroits – Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore) – Métal d'apport incompatible avec le métal de base – Cordon trop petit – Trop de retraits durant ou après le soudage	– Bien mesurer les angles des chanfreins. – Préchauffer et chauffer en cours de soudure. – Bien choisir le métal d'apport. – Refroidir lentement. – Procéder à un traitement thermique après soudage (normalisation, recuit). – Effectuer un cordon suffisamment large, réduire la vitesse au besoin. – En cas de retraits, effectuer un léger retour en arrière et ajuster la procédure de soudage.



Exercice 6.2

1. Dans la figure 6.24, associez les paramètres fautifs aux défauts qu'ils risquent d'entraîner (un paramètre fautif peut être responsable de l'apparition d'un ou de plusieurs défauts).

Figure 6.24

Paramètres		Défauts
a) Vitesse de soudage trop lente		1. Soufflures
b) Métal d'apport incompatible avec le métal de base		2. Manque de pénétration
c) Intensité du courant ou chaleur trop élevée		3. Cordon trop étroit
d) Impuretés dans le bain de fusion		4. Inclusions de laitier
e) Intensité du courant trop faible		5. Projections
f) Arc instable		6. Caniveaux
g) Vitesse de soudage trop rapide		7. Retassures
h) Joints trop étroits		8. Effondrement

2. Dans la figure 6.25, associez les définitions ou les illustrations aux défauts correspondants.

Figure 6.25

Définitions ou illustrations		Défauts
a)		1. Retassure à la racine
b) Défaut souvent sphérique causé par la présence de gaz dans la soudure		2. Collage à la racine
c)		3. Manque de pénétration
d) Gouttelettes de métal d'apport jaillissant et se déposant sur le métal de base, autour du cordon		4. Inclusion
e)		5. Trou
f) Perforation de la soudure généralement causée par un chauffage local trop intense		6. Surépaisseur du cordon
g) Corps solide étranger		7. Excès de pénétration
h) Cordon plus épais que les dimensions prescrites ou que les normes tolérées		8. Projections
i)		9. Soufflures

Contrôle de la qualité d'un cordon de soudure

Un cordon de soudure de qualité est un cordon :

– régulier, c'est-à-dire dont la largeur et l'épaisseur sont constantes et conformes aux spécifications;
– dont les stries sont rapprochées les unes des autres;
– dont les côtés sont bien fusionnés au métal de base;
– lisse et exempt d'inclusion.

Tolérance générale

La grosseur tolérée des défauts peut dépendre de la grosseur du cordon de soudure, de la nature statique ou dynamique de la pièce, du type d'assemblage, des pressions exercées sur la pièce, de sa fonction et de la visibilité de la soudure (certaines soudures, plus visibles, doivent être plus esthétiques).

Détection des défauts

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la qualité d'une soudure. Les défauts internes doivent être détectés par rayon X ou par ultrasons. Pour les défauts débouchants, il existe quatre principales méthodes de détection (figure 6.26).

Figure 6.26 Détection des défauts

Méthode	Description
Contrôle dimensionnel	Prise des mesures de la soudure pour assurer sa conformité avec les spécifications.
Contrôle visuel	Examen de la soudure, à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe, afin de détecter certains défauts qui débouchent en surface, l'excès ou le manque de métal d'apport, les caniveaux et les défauts de forme du cordon (convexité, concavité).
Contrôle par ressuage	Permet de déceler les petites fissures de surface par l'application d'un liquide teinté, très fluide ; après le nettoyage à l'aide d'un solvant, le liquide qui a coulé au fond des fissures demeure. Ce type de contrôle s'applique à tous les matériaux, mais selon le liquide utilisé, il nécessite parfois l'usage d'une lampe à ultraviolet.
Contrôle magnétique	On recouvre le métal d'une poudre magnétique puis on le soumet à un champ magnétique. Les imperfections provoquent une répartition non uniforme de la poudre. Cette technique n'est cependant applicable qu'aux métaux magnétiques.

Résumé

- La fissuration résulte généralement de tensions internes trop importantes dans le cordon de soudure ou dans la zone chauffée durant le soudage (ZTA). Les fissures peuvent apparaître très tôt (fissuration à chaud) ou des heures, voire des jours après le soudage (fissuration à froid). Les causes les plus fréquentes de fissuration sont un refroidissement trop rapide, un métal d'apport incompatible avec le métal de base ou une mauvaise préparation des joints.
- En plus des fissures, il existe plusieurs types de défauts de soudure : les défauts dimensionnels (mauvaise dimension du cordon sur la largeur ou sur l'épaisseur), les défauts de géométrie du cordon, les défauts de pénétration, les soufflures, les inclusions, les caniveaux, les retassures, les projections et les défauts de fusion.
- Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs, dont la vitesse d'avance ou l'intensité du courant. Dans bien des cas, les défauts peuvent être détectés et corrigés en cours de soudage.

Notes

Notes

Chapitre 7

LECTURE DE PLANS ET PRÉPARATION

Ce chapitre présente les informations qu'on retrouve sur les plans de soudage de même que la symbolisation utilisée.

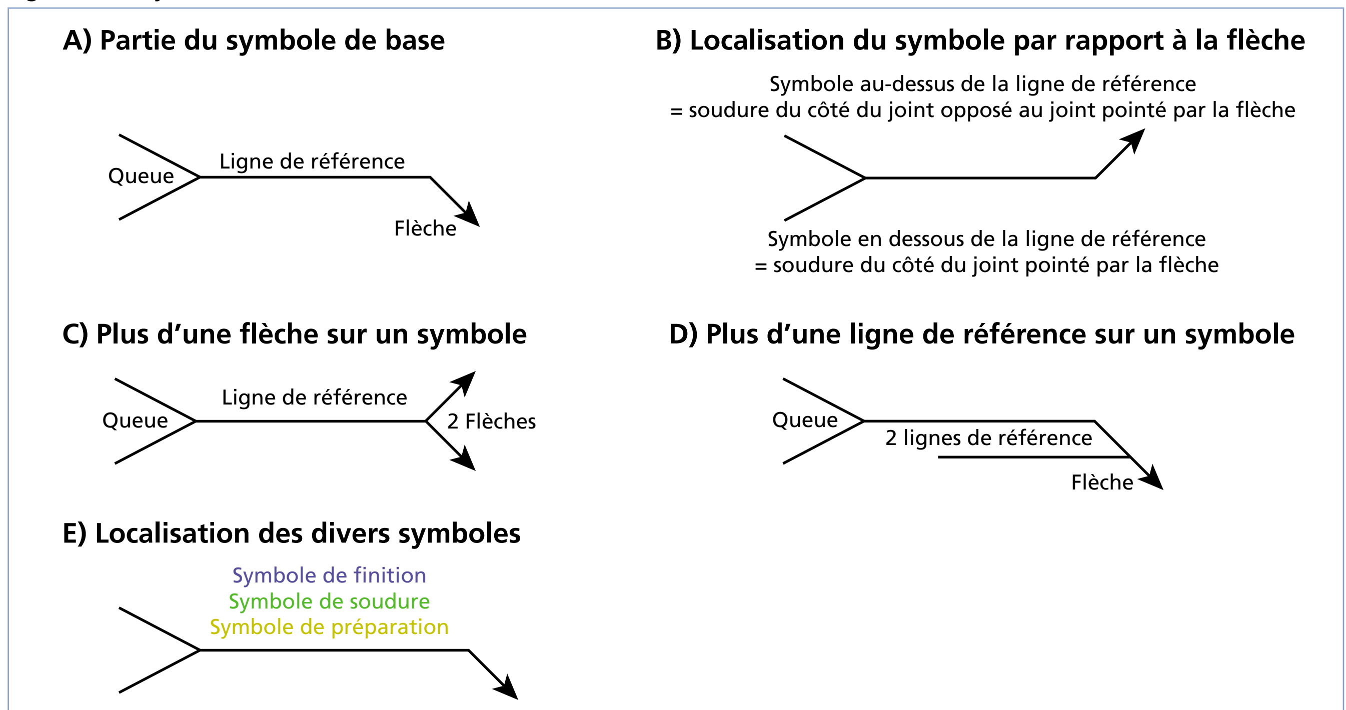
Symbolisation en soudage

Les symboles de soudage peuvent être classés en quatre catégories :
- symboles de base ;
- symboles de préparation ;
- symboles de soudure (type et dimension) ;
- symboles complémentaires (incluant les symboles de contour et de finition).

Symboles de base

Le symbole de base en soudage (partie A de la figure 7.1) se compose de trois parties : ligne de référence, queue et flèche. La localisation du symbole par rapport à la ligne de référence détermine où la soudure doit être exécutée (partie B). Il peut parfois y avoir plus d'une flèche sur un même symbole afin de pointer plus d'un joint (partie C).

Figure 7.1 Symboles de base

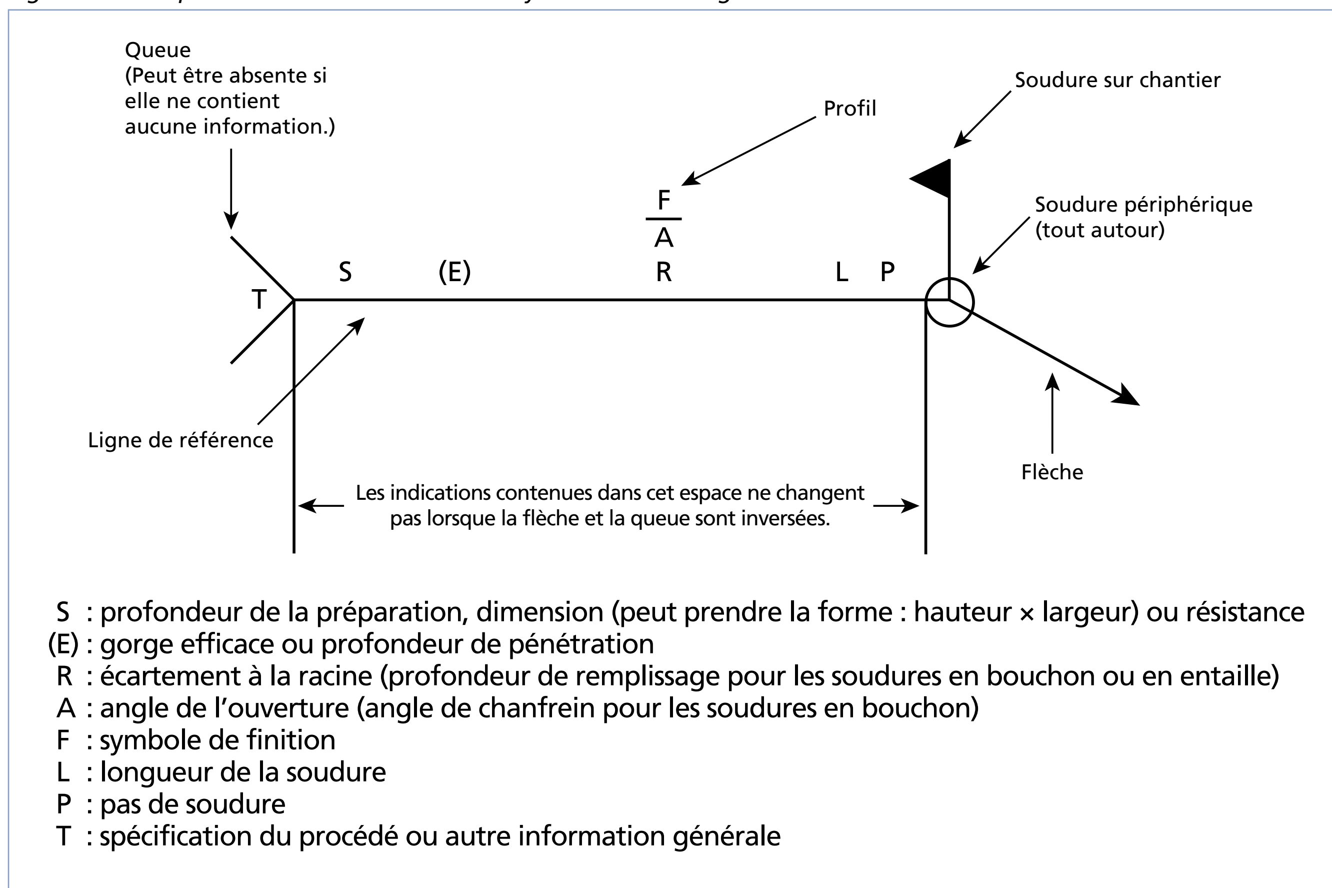


Les dimensions de la soudure sont indiquées de part et d'autre de la ligne de référence de même que le type de soudure requis, la préparation des joints à réaliser et toute autre information relative à la soudure (ex. : finition). À noter que la ligne de référence est toujours horizontale. De plus, ici aussi les informations en dessous de la ligne concernent le côté du joint pointé par la flèche, tandis que les informations au-dessus concernent le côté opposé au joint pointé par la flèche. Il peut y avoir plusieurs lignes de référence pour un même symbole s'il y a plusieurs opérations de soudage à exécuter (partie D). Dans ce cas, on commence par exécuter les opérations décrites sur la ligne la plus éloignée de celle rattachée à la flèche.

Les procédés à utiliser, le type d'électrode, la méthode de soudage et d'autres informations complémentaires générales peuvent être inscrites dans la queue. Enfin, les symboles de préparation sont situés immédiatement au-dessus ou en dessous de la ligne de référence, avant les symboles de soudure et les symboles de finition (partie E).

L'emplacement général des éléments d'un symbole de soudage est illustré à la figure 7.2.

Figure 7.2 Emplacement des éléments d'un symbole de soudage



Symboles de préparation

Le tableau de la figure 7.3 illustre les principaux symboles de préparation utilisés en soudage.

Figure 7.3 Symboles de préparation

Symbole	Signification
	Préparation à bords droits
	Chanfreins en demi-V*
	Chanfreins en demi-V double*
	Préparation en V
	Préparation en V double
	Préparation en J*
	Préparation en J double*
	Préparation en U
	Préparation en U double
	Préparation à bord tombé*
	Préparation à bord relevé*
	Préparation à onglet

* La flèche brisée pointe le côté du joint à préparer.

Lorsque la pièce doit être coupée, on utilise certains codes pour indiquer le procédé de coupage à utiliser (figure 7.4). Ces codes apparaissent dans la queue, comme les symboles de procédés.

Figure 7.4 Codes de préparation des pièces

Code de préparation	Signification
OAC (ou OFC-A)	Oxycoupage
PAC	Coupage au jet de plasma
AAC	Coupage à l'arc-air

Symboles de soudure

Le tableau de la figure 7.5 présente les principaux symboles de soudure utilisés.

Figure 7.5 Symboles de soudure

Symbole	Signification
	Soudure bout à bout
	Soudure d'angle
	Soudure par points
	Soudure en bouchon ou en entaille
	Soudure de goujon
	Soudure continue traversante ou à molette
	Surfaçage (soudure de rechargement)
	Soudure sur chant

Généralement, à la droite du symbole de soudure, on trouve la longueur et, au besoin, la longueur du pas de soudure. À la gauche, on trouve les dimensions de la soudure, soit la profondeur (si le chiffre est entre parenthèses), la grosseur, la largeur, l'épaisseur du cordon ou le diamètre de la soudure en fonction du type de soudure en question. Un chiffre dans le symbole de soudure indique l'écartement des pièces ou l'épaisseur de la soudure, en fonction du type de soudure.

La figure 7.6 présente quelques exemples simples de soudures avec indications dimensionnelles.

Figure 7.6 Exemples d'utilisation des symboles de soudure

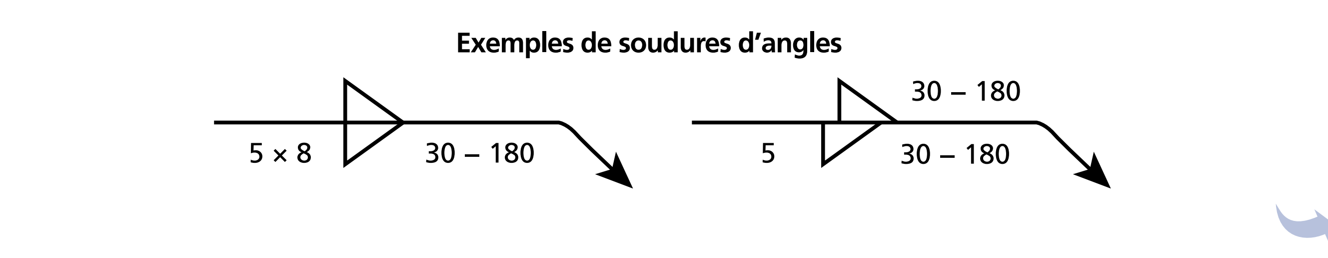
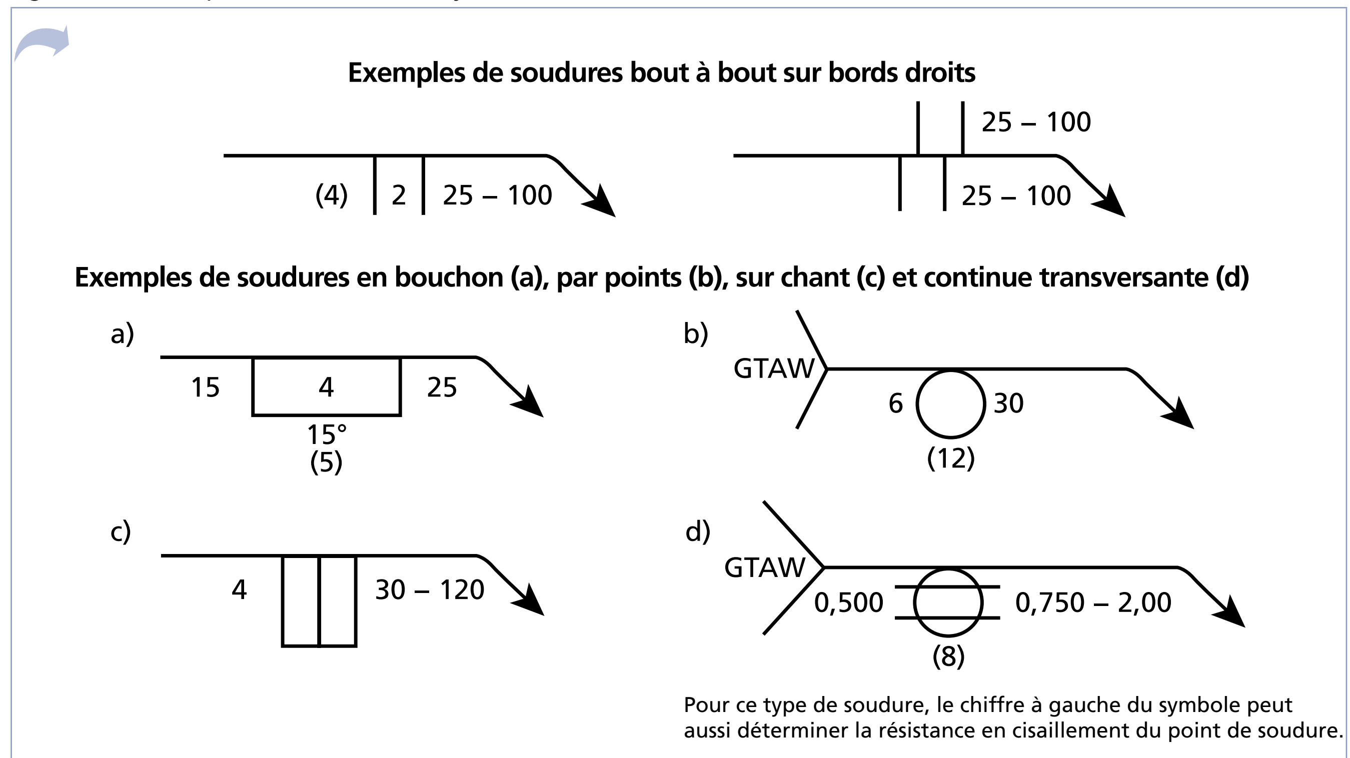


Figure 7.6 Exemples d'utilisation des symboles de soudure (suite)



Symboles complémentaires

Les figures 7.7 et 7.8 présentent certains symboles complémentaires généraux et les symboles complémentaires de contour utilisés en soudage.

Figure 7.7 Symboles complémentaires

Symbole	Signification
	Soudure tout autour
	Soudure sur chantier
	Soudure pleine pénétration
	Cordon de soudure arrière
Type de support	Support à intégrer à l'arrière* - **
Type de support	Support à intégrer au centre**

* Le type de support est généralement indiqué dans la flèche; un R dans le carré indique un support à enlever après soudage.
** On a une soudure en V.

Figure 7.8 Symboles complémentaires de contour

Symbole	Signification
	Contour ras
	Contour convexe
	Contour concave

Note : Pour une soudure d'angle, les symboles peuvent être orientés horizontalement, alignés sur le symbole de soudure d'angle.

Quant à la figure 7.9, elle présente les principales lettres associées à la finition des contours. Ces symboles de finition font aussi partie des symboles complémentaires de soudure.

Figure 7.9 Symboles complémentaires de finition

Symbole	Signification
C	Burinage
G	Meulage
H	Martelage
M	Usinage
R	Laminage

Codes des positions de soudage

Sur les plans et les procédures de soudage, les positions sont généralement codifiées. Le tableau de la figure 7.10 présente les codes associés à chaque position. Ces codes dépendent non seulement des positions de soudage, mais aussi des assemblages.

Figure 7.10 Positions de soudage

Type de soudure	Code de position	Position	Illustration
Soudure d'angle (F)	1F	À plat	Gorge verticale de la soudure; 45°; Axe horizontal de la soudure
	2F	Horizontale	Axe horizontal de la soudure
	3F	Verticale	Axe vertical de la soudure

Figure 7.10 Positions de soudage (suite)

Type de soudure	Code de position	Position	Illustration
Soudure d'angle (F) (suite)	4F	Au plafond	Axe horizontal de la soudure
Soudure sur préparation (G)	1G	À plat ou tuyau horizontal	15° 15° 1G
	2G	Horizontale	15° 15° 2G
	3G	Verticale	
	4G	Au plafond	
	5G	Tuyau horizontal fixe	15° 15°
	6G	Tuyau à angle	45° ±5°

Figure 7.10 Positions de soudage (suite)

Type de soudure	Code de position	Position	Illustration
Soudure bout à bout avec plaque de support (GF)	1GF	À plat	
	2GF	Horizontale	
	3GF	Verticale	
	4GF	Au plafond	

Symboles en soudage

Les symboles de soudage s'associent les uns aux autres pour former une gamme presque infinie de combinaisons. Il faut reconnaître chacun des symboles dans une combinaison pour bien comprendre la tâche à réaliser.

Les points importants à retenir sont donc :
- la signification de chaque symbole ;
- la position du symbole par rapport à la flèche ;
- les caractéristiques chiffrées du cordon.

Figure 7.11 Exemples de combinaisons de symboles

Soudure sur bords tombés et soudure d'angle

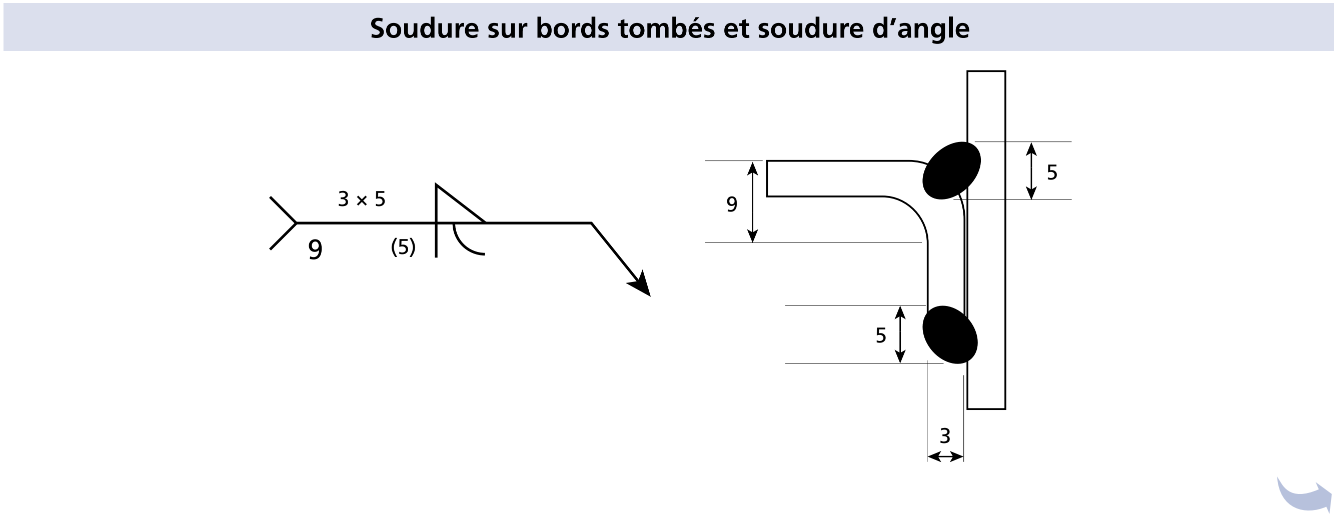
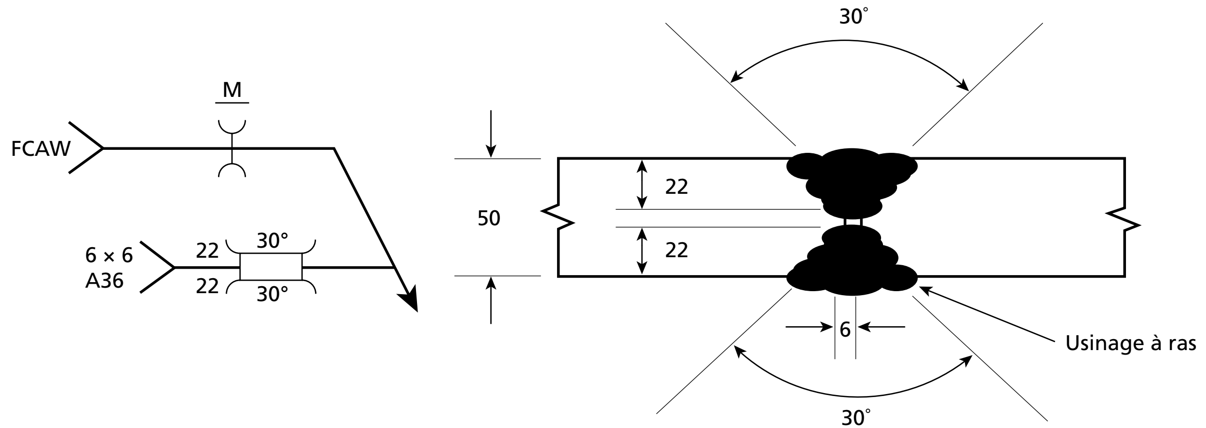


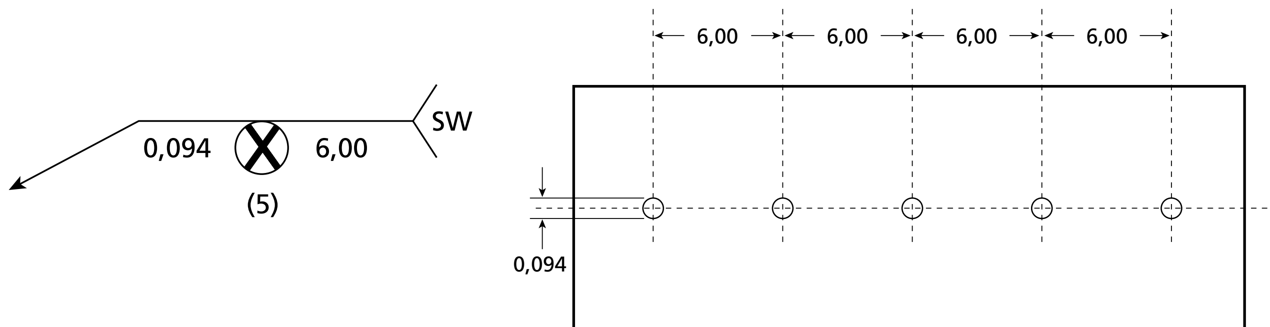
Figure 7.11 Exemples de combinaisons de symboles (suite)



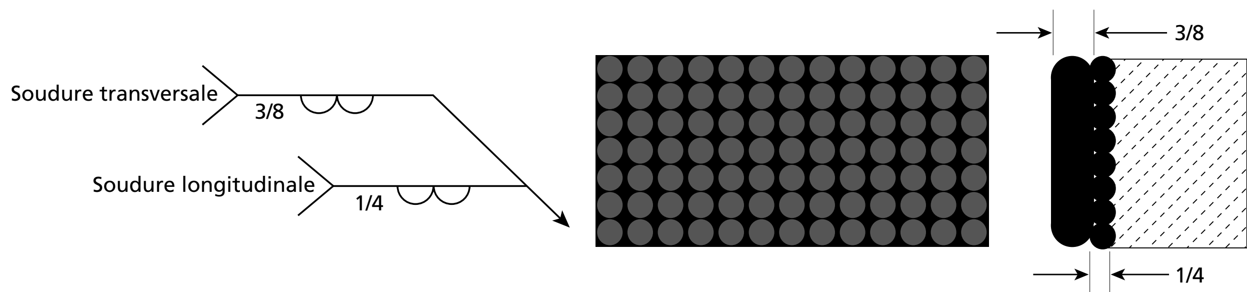
Soudure sur préparation en double U avec support au centre



Soudure de goujons



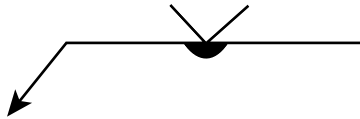
Surfaçage

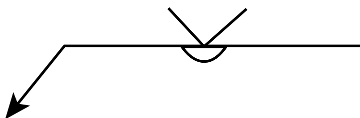


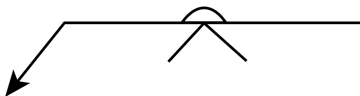


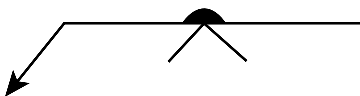
Exercice 7.1

1. Quel symbole indique que les pièces seront chanfreinées en V du côté opposé à la flèche avec un cordon de reprise à l'envers ?

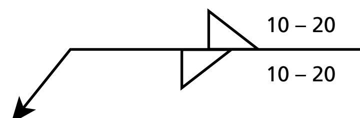
a) 

b) 

c) 

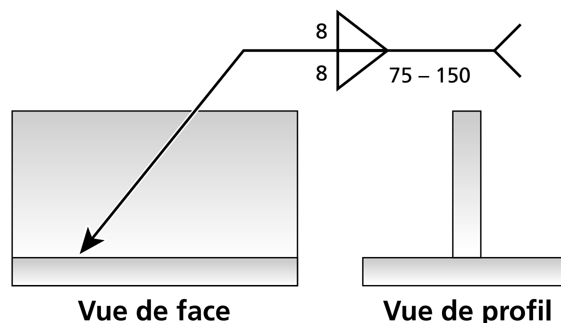
d) 

2. Le symbole suivant indique une soudure d'angle de quel type ?

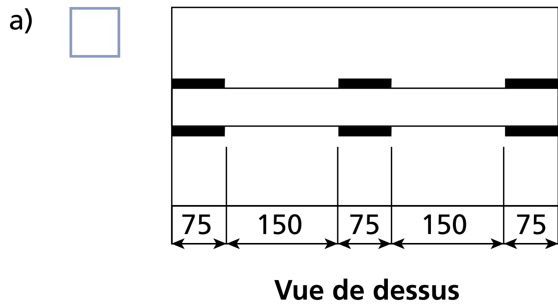


a) Intermittente opposée de longueur 10 et ayant un pas de 10 ☐
b) Continue bout à bout de largeur 10 et de longueur 20 ☐
c) Intermittente à alternance de longueur 10 et ayant un pas de 20 ☐
d) Continue sur assemblage de longueur 10 et de largeur 20 ☐

3. À quelle soudure correspond le symbole suivant ?

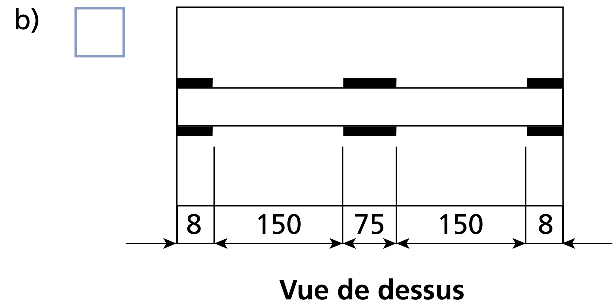


a) ☐



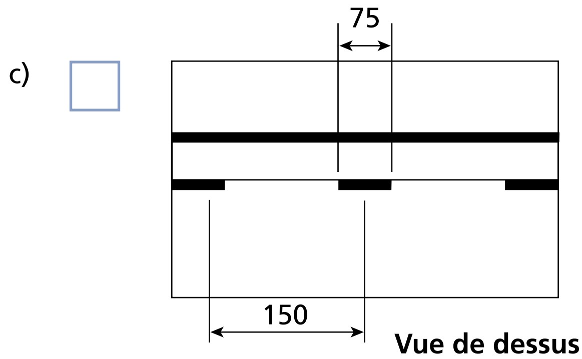
Vue de dessus

b) ☐



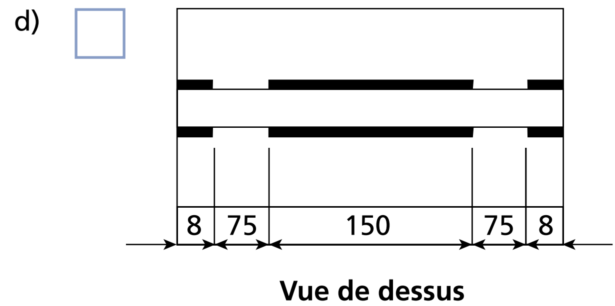
Vue de dessus

c) ☐



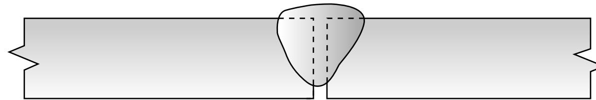
Vue de dessus

d) ☐

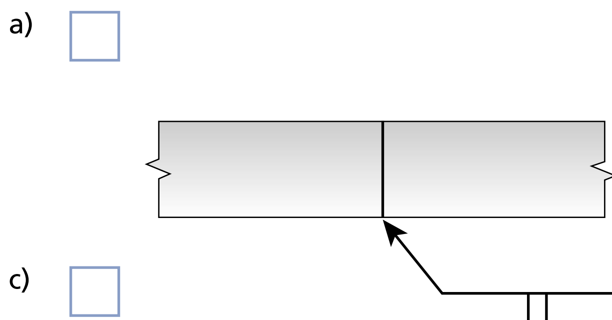


Vue de dessus

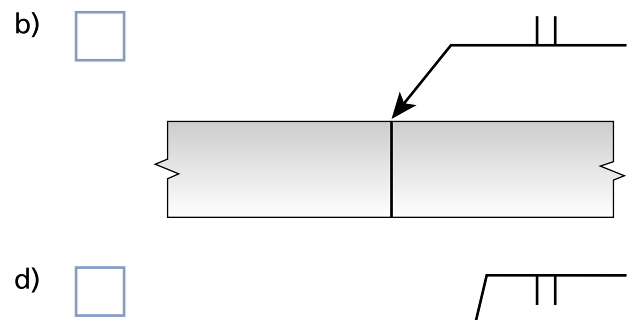
4. Quel symbole correspond à la soudure désirée suivante ?



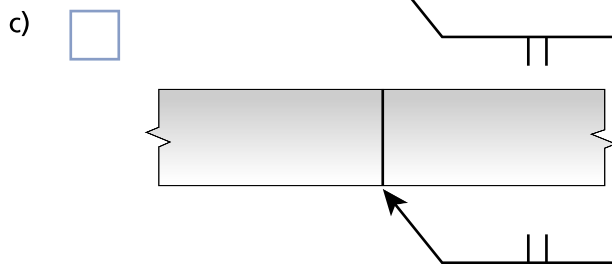
a) ☐



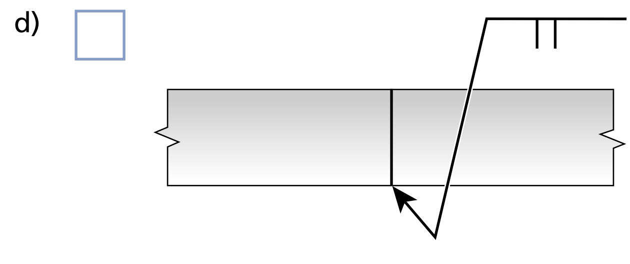
b) ☐



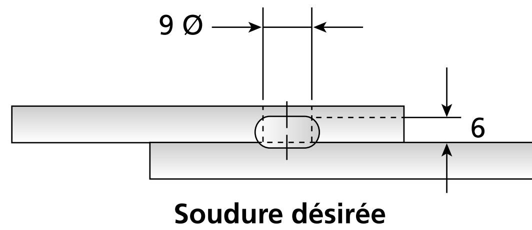
c) ☐



d) ☐

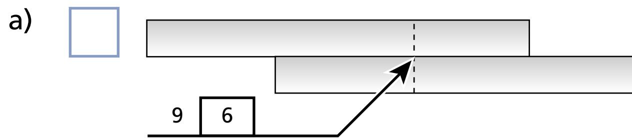


5. Quel symbole correspond au joint suivant ?

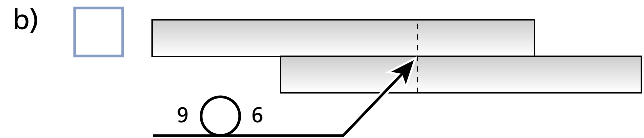


Soudure désirée

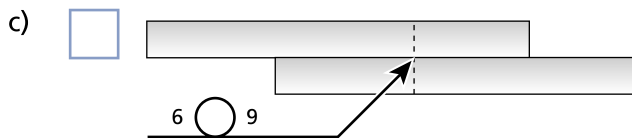
a) ☐



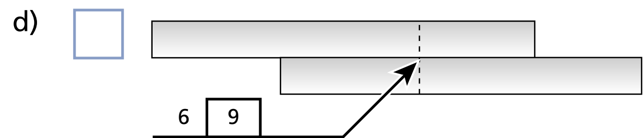
b) ☐



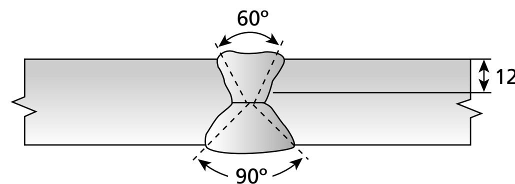
c) ☐



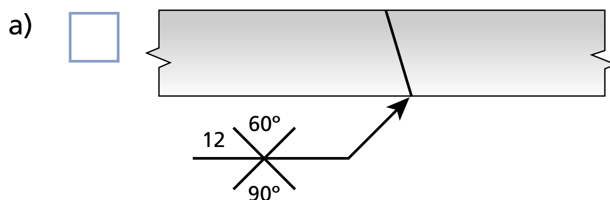
d) ☐



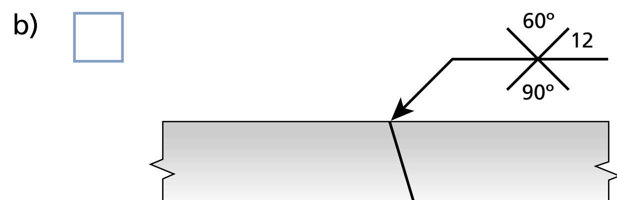
6. Quel symbole correspond à la soudure désirée suivante ?



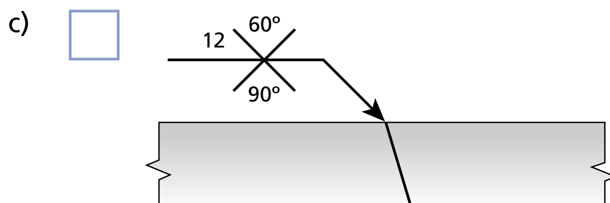
a) ☐



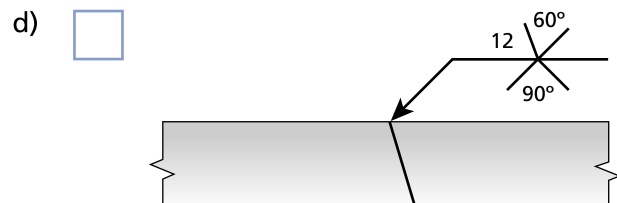
b) ☐



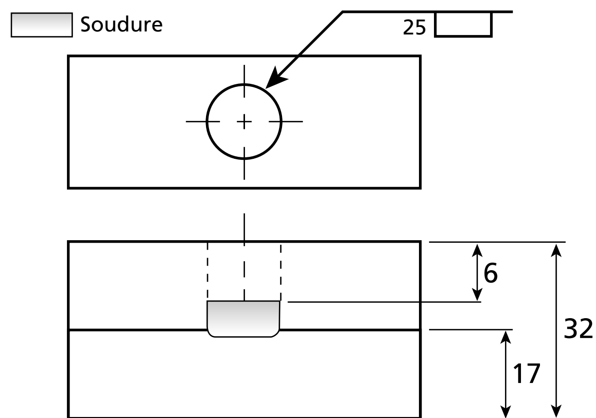
c) ☐



d) ☐



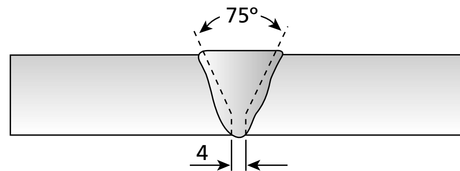
7. Quelle est l'épaisseur (hauteur) de la soudure par bouchon suivante ?



a) 9 mm ☐
b) 15 mm ☐
c) 25 mm ☐
d) 32 mm ☐

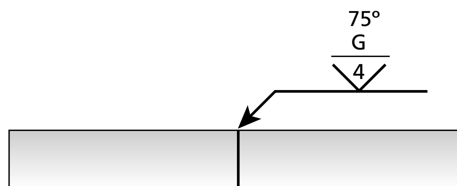
8. Quel symbole correspond au joint suivant ?

Finition lisse avec la meule

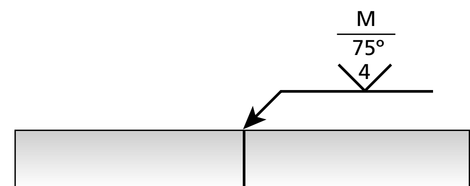


Soudure désirée

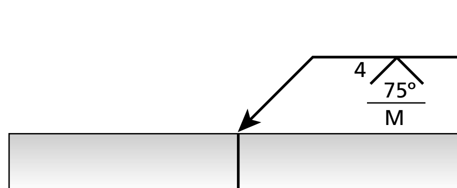
a) ☐



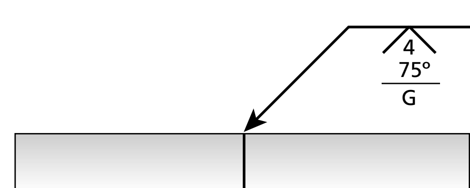
b) ☐



c) ☐

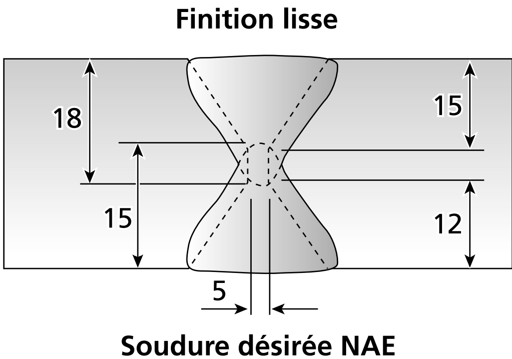


d) ☐



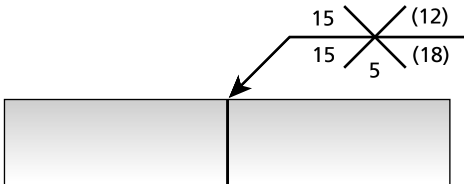
9. Quel symbole correspond au joint suivant ?

Finition lisse

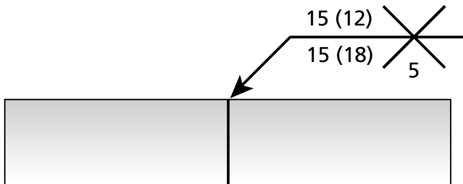


Soudure désirée NAE

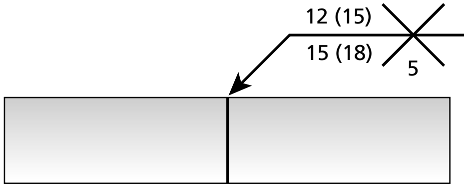
a) ☐



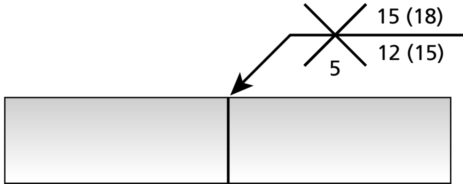
b) ☐



c) ☐

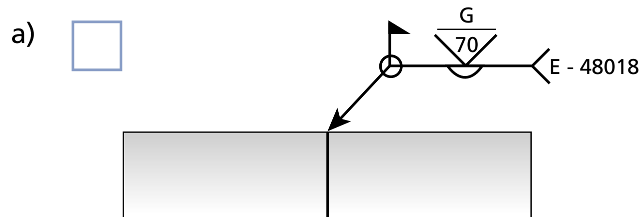


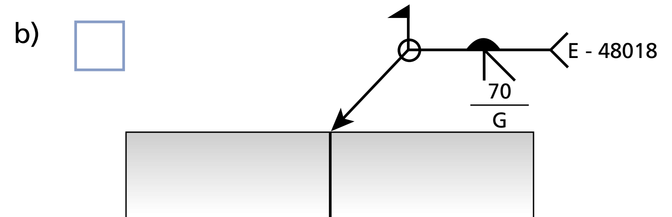
d) ☐

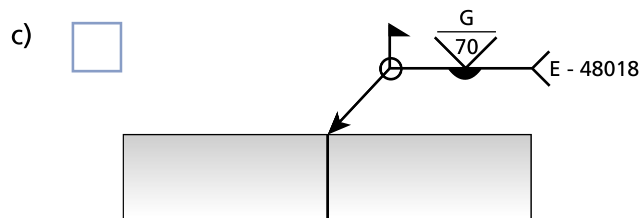


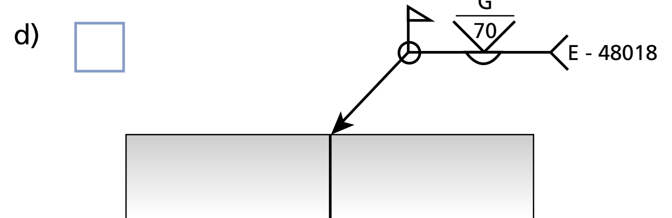
10. Quel symbole correspond à la description suivante d'un joint ?

Caractéristiques du joint :
- bord à bord ;
- chanfreiné en V ;
- soudé au plafond ;
- avec métal d'apport E-48018 ;
- pénétration complète ;
- soudure sur chantier ;
- soudure tout le tour ;
- angle de chanfrein à 70° ;
- surface du cordon lisse par meulage.

a) ☐


b) ☐


c) ☐


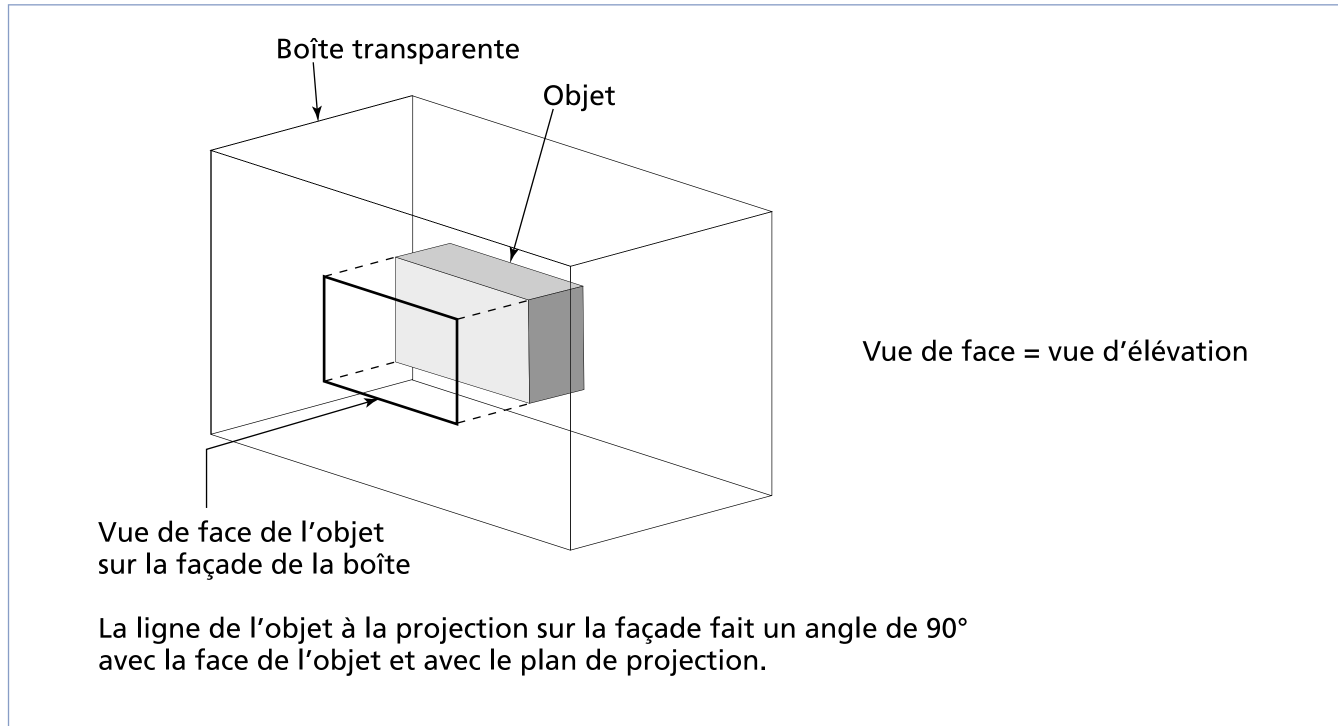
d) ☐


Lecture de plans

Projection orthogonale

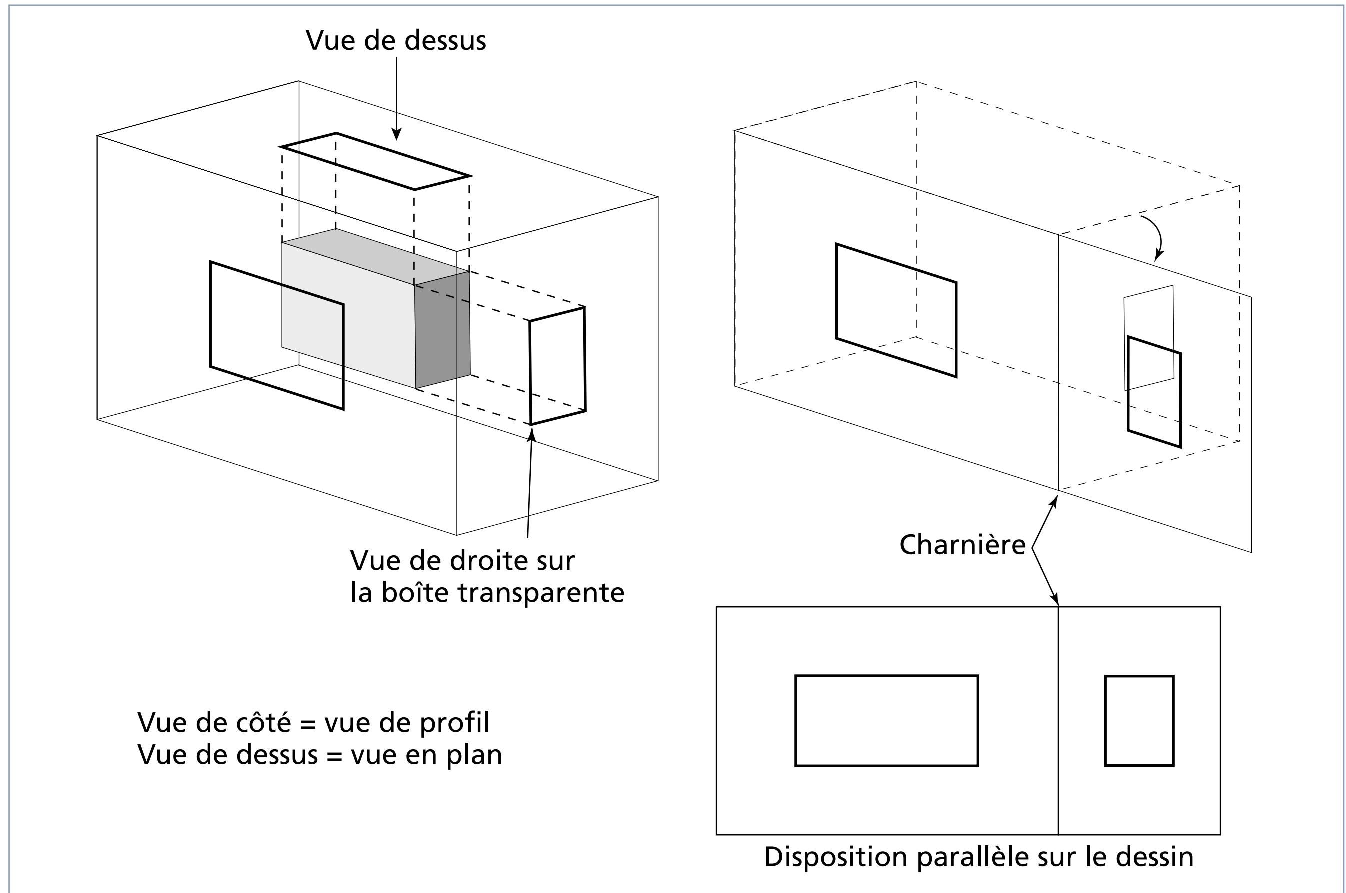
La projection orthogonale est une perspective permettant de visualiser les côtés d'un objet comme si on le regardait perpendiculairement à la ligne de vision, c'est-à-dire à 90° (figure 7.12).

Figure 7.12 Projection orthogonale : vue de face



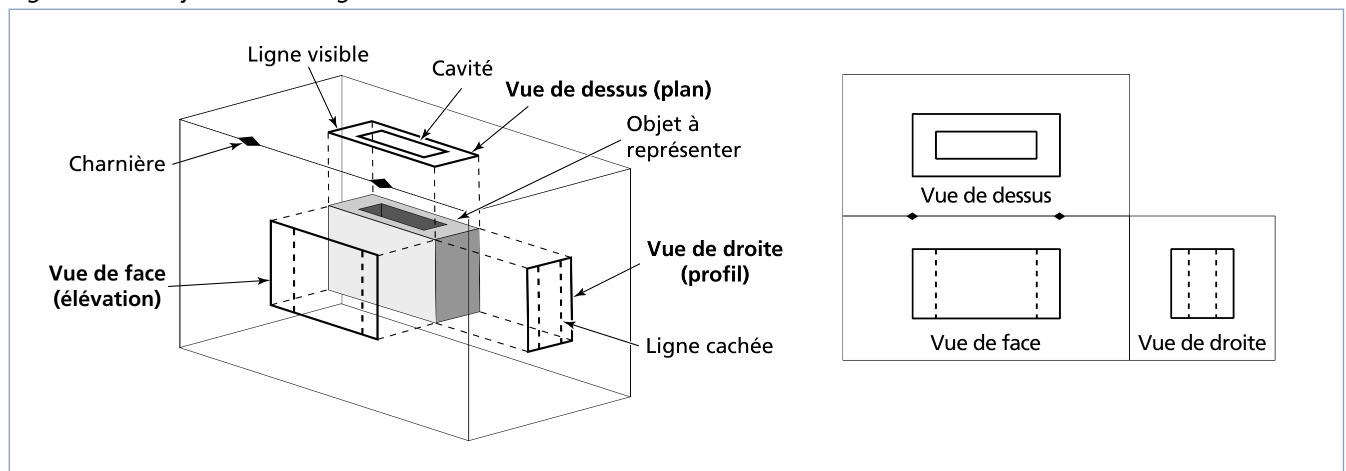
Sur un plan dessiné en fonction de la projection orthogonale, on distingue généralement trois sections, soit une de face, une de côté et une de dessus (figure 7.13).

Figure 7.13 Projection orthogonale : les trois dimensions



Si un objet est très complexe, on peut inclure jusqu'à six perspectives (incluant les vues de gauche, de dessous et d'arrière). Par contre, trois perspectives suffisent en général. Les lignes pointillées sur une face indiquent les sections cachées (figure 7.14).

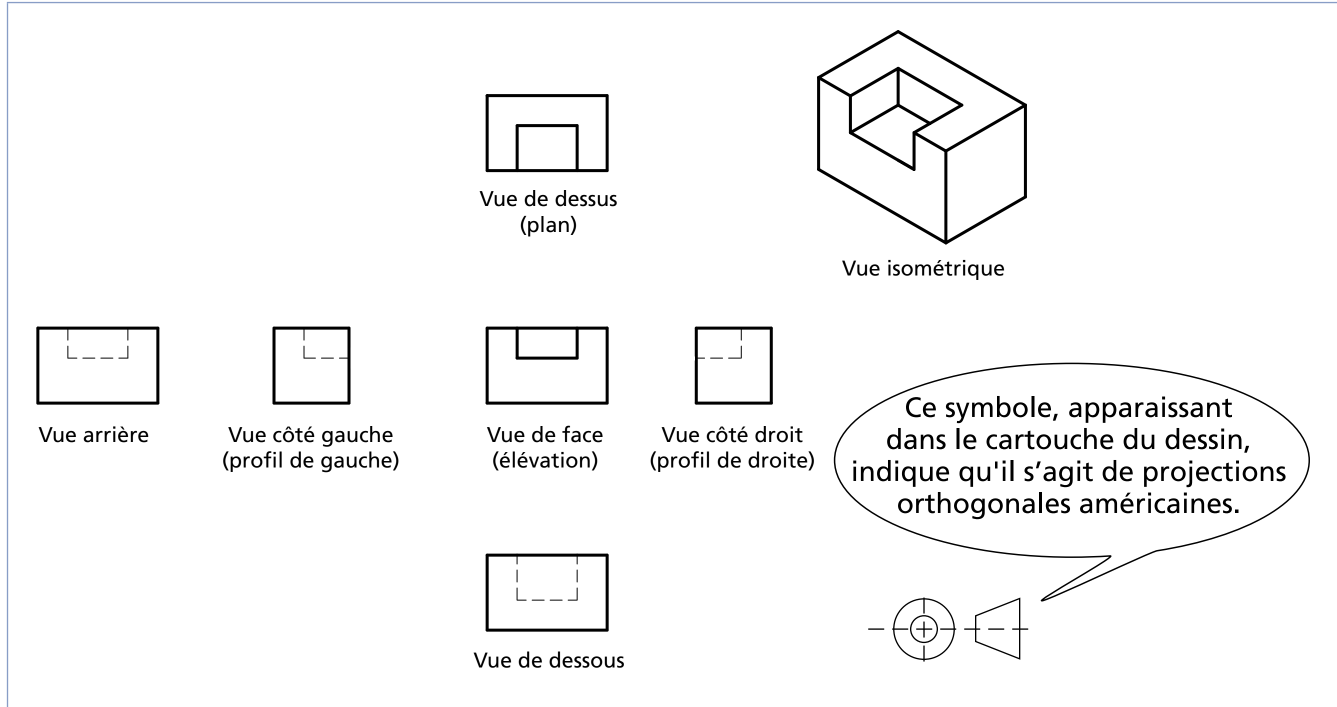
Figure 7.14 Projection avec lignes cachées



Projection orthogonale américaine

Les projections orthogonales américaines sont caractérisées par la position des différentes sections de l'objet sur le plan : la droite est à droite, le dessus est en haut et la vue de face est au centre (figure 7.15).

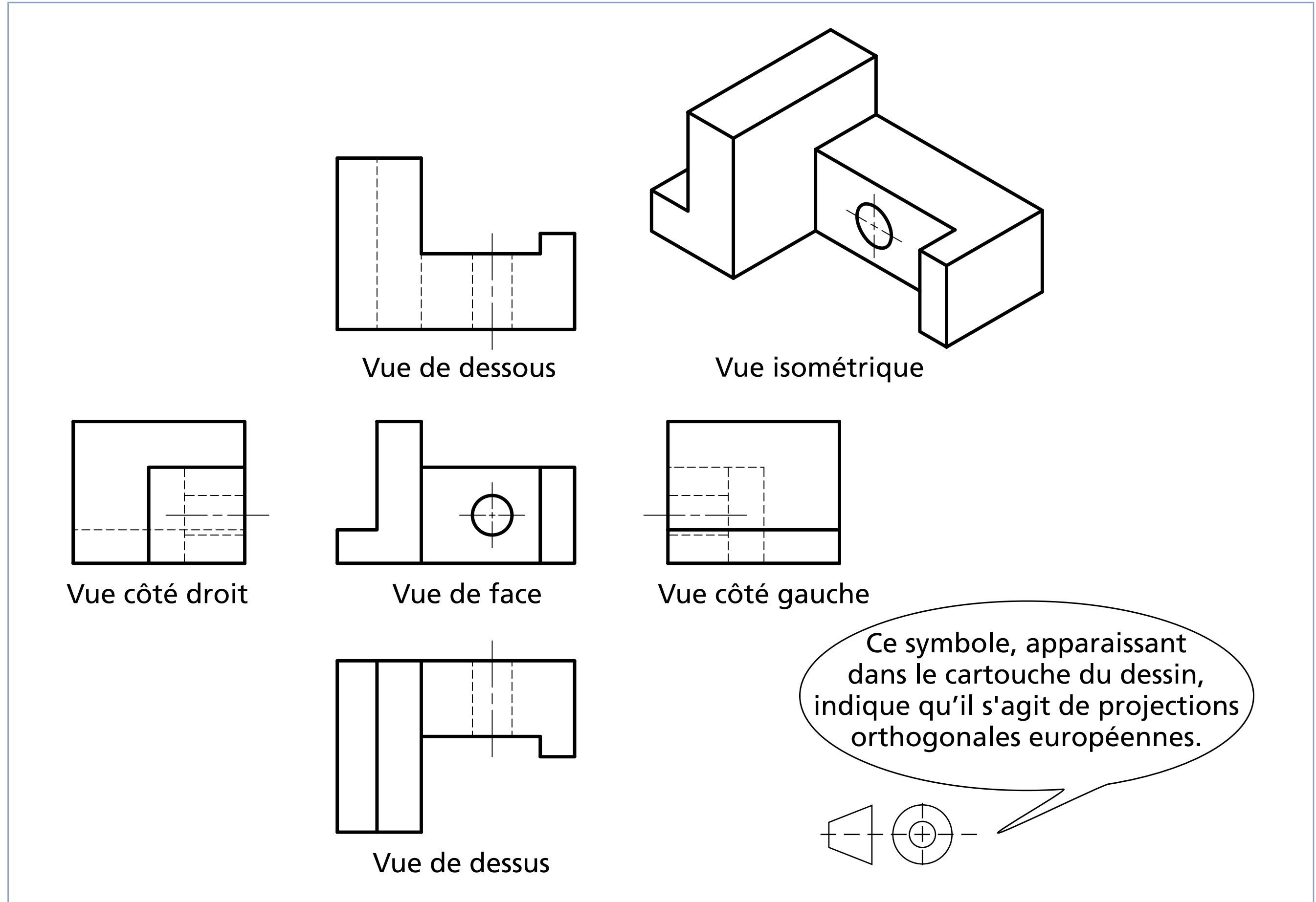
Figure 7.15 Projection orthogonale américaine de six faces



Projection orthogonale européenne

Les projections orthogonales européennes sont essentiellement inversées par rapport aux projections américaines : la vue de droite est à gauche et celle du dessus est en dessous de la vue de face (figure 7.16).

Figure 7.16 Projection orthogonale européenne





Exercice 7.2

1. Associez les images ou les définitions de la colonne de gauche aux éléments correspondants de la colonne de droite.

Figure 7.17

Définitions ou illustrations		Types de vue
a) Correspond à la face de dessus d'une projection orthogonale.	☐	1. Projection orthogonale
b)	☐	2. Vue en élévation
c) Correspond à la face avant (au centre) d'une projection orthogonale.	☐	3. Vue de profil
d)	☐	4. Vue en plan
e) Perspective permettant de visualiser les côtés d'un objet comme si on le regardait à 90° par rapport à la ligne de vision.	☐	5. Projection orthogonale américaine
f) Correspond à la face de côté d'une projection orthogonale.	☐	6. Projection orthogonale européenne

2. Pour chacune des vues présentées en a et en b, indiquez la lettre correspondant à chacune des faces de l'objet.

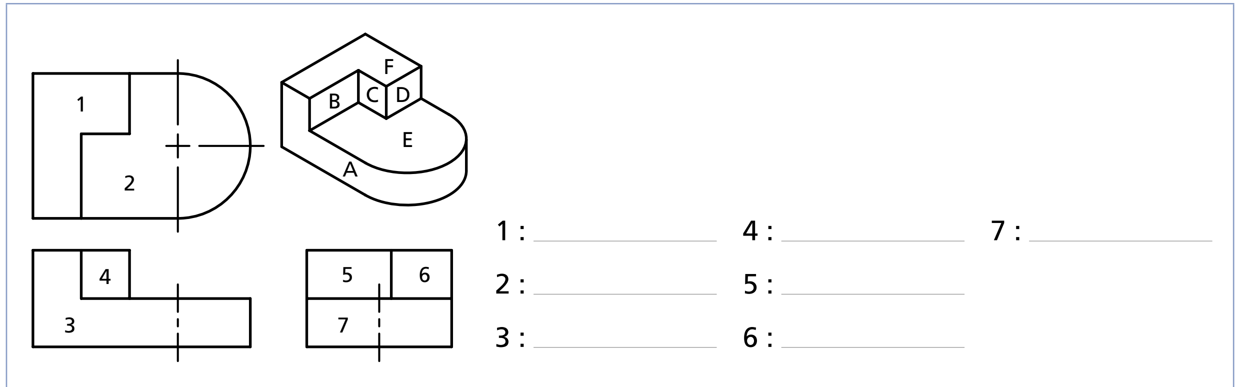
a) *Figure 7.18*

1 : ____________ 4 : ____________ 7 : ____________

2 : ____________ 5 : ____________ 8 : ____________

3 : ____________ 6 : ____________ 9 : ____________

b) *Figure 7.19*



Plan

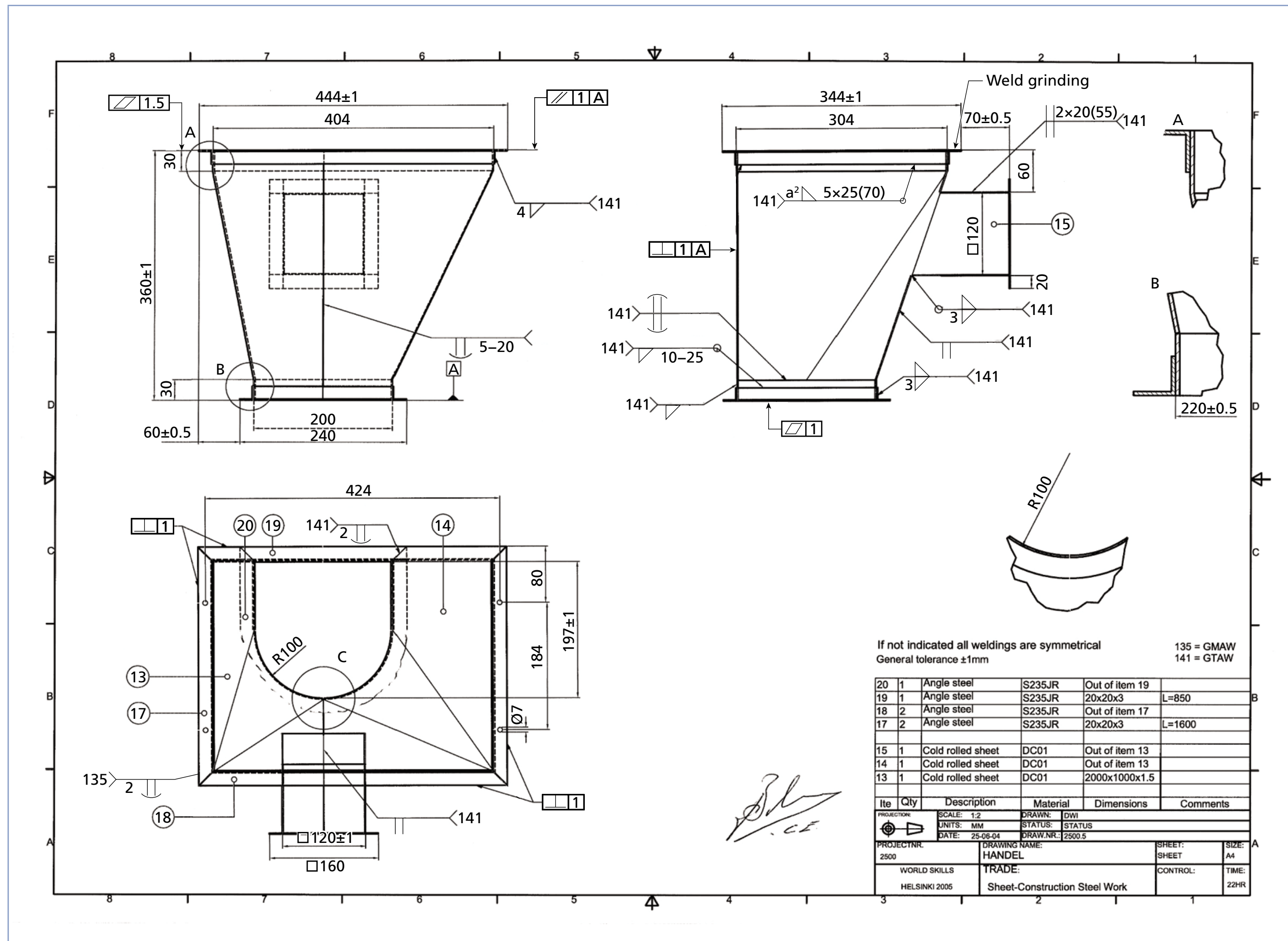
Un plan d'assemblage comprend généralement deux parties (figure 7.20) :

– le plan proprement dit, incluant :
  - le croquis de la pièce ;
  - les symboles ;
  - les références aux procédures de soudage ;

– le cartouche, soit un rectangle en bas à droite du plan, contenant généralement :
  - le nom de la pièce, du mécanisme dont elle est issue ;
  - le titre du plan et son numéro ;
  - l'identification de la compagnie ou du dessinateur ;
  - la désignation des pièces ;
  - le type de projection illustré (américaine ou européenne) ;
  - l'échelle et le système de mesures utilisés (international ou impérial) ;
  - la date de la dernière modification.

La liste du matériel se trouve sur le cartouche ou sur un bordereau joint au plan.

Figure 7.20 Plan



Procédure de soudage

Lorsqu'il y a une procédure de soudage associée au plan, on trouve son numéro sur celui-ci. Habituellement, la procédure accompagne le plan à moins qu'elle soit suffisamment simple ou générale pour être inscrite directement sur ce dernier et qu'elle soit bien connue dans l'entreprise.

La figure 7.21 présente une procédure de soudage typique.

Figure 7.21 Procédure de soudage

Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle	**PROCÉDURE DE SOUDAGE**	Nº de la procédure de soudage :
	Soudage et assemblage-soudage	Normes applicables :

PROCÉDÉ DE SOUDAGE :

☐ Pulsé
☐ Autre

☐ Manuel (SMAW)
☐ Fil fourré (FCAW)
☐ Fil tubulaire (MCAW)

☐ Arc submergé (SAW)
☐ Arc sous protection gazeuse avec électrode de tungstène (GTAW)
☐ Fil plein (GMAW)

Classification du métal d'apport :

Gaz de protection ou flux :

MODE D'APPLICATION

☐ Manuel
☐ Semi-automatique
☐ Automatique

Classification du tungstène :	Diamètre de la buse (mm) :	Température de préchauffage :
Diamètre de l'électrode de tungstène (mm) :	Longueur libre de l'électrode de tungstène (mm) :	Température min. entre les passes. :

Métal de base :	Position de soudage :	Température max. entre les passes. :

PRÉPARATION DU JOINT	**PASSES ET COUCHES**

SOUDURE SUR PRÉPARATION À PÉNÉTRATION COMPLÈTE

☐ Soudage d'un côté sans support à l'envers
☐ Soudage avec support à l'envers
☐ Gougeage à l'envers jusqu'au métal sain
☐ Soudage des deux côtés sans support à l'envers
☐ Soudage avec support à l'envers autre qu'en acier

☐ Purge ____________

☐ Soudure sur préparation à pénétration partielle

☐ Soudure d'angle

TYPE D'ASSEMBLAGE

☐ Bout à bout
☐ En T
☐ En L
☐ Sur chant
☐ À recouvrement

Épaisseur du métal (mm)	Électrode	Dimensions de la soudure (mm)	Nº du côté	Nº des couches	Nº des cordons	Diamètre de l'électrode ou de la baguette (mm)	Courant	Intensité ±10 %	Longueur terminale (mm) :		Transfert :		
											Débit du gaz de protection :		
									Vitesse de dévidage :		Tension (V)	Vitesse d'avance :	
									po/min	mm/min		po/min	mm/min

Explications – notes : ____________



Exercice 7.3

1. Parmi les éléments suivants, lesquels trouve-t-on généralement sur un cartouche ?

   a) Nom de la pièce ☐
   b) Symboles de soudure ☐
   c) Liste du matériel ☐
   d) Symboles d'assemblage ☐
   e) Échelle ☐
   f) Dates de création et de la dernière modification ☐
   g) Type de projection utilisé (américaine ou européenne) ☐

2. Répondez aux questions suivantes à l'aide de la procédure de la figure 7.22.

   a) Quel est le type de joint illustré ?

   – Soudure bout à bout avec plaque de support sur préparation en V ☐
   – Soudure bout à bout avec plaque de support sur préparation en demi-V ☐
   – Soudure d'angle avec plaque de support sur préparation en demi-V ☐
   – Soudure d'angle avec plaque de support sur préparation en V ☐

   b) À quel pôle électrique trouvera-t-on l'électrode ?

   – Au pôle positif ☐
   – Au pôle négatif ☐
   – Aux deux pôles en alternance ☐

   c) Par exemple, le diamètre de l'électrode est de 3,2 mm et l'épaisseur du métal de base est de 9,6 mm. Que se passerait-il si l'épaisseur du métal de base était de 12,6 mm ?

   – On devrait choisir une électrode de plus petit diamètre. ☐
   – On devrait choisir une électrode de diamètre identique. ☐
   – On devrait choisir une électrode de plus grand diamètre. ☐

   d) Quelles seraient les limites minimale et maximale d'intensité pour cette soudure ?

   – 126 A et 154 A ☐
   – 111 A et 199 A ☐
   – 0 A et 140 A ☐

   e) Que signifie le code **GF** sous « Position de soudage » ?

   – Soudage bout à bout à plat ☐
   – Soudage d'angle à plat ☐
   – Soudage bout à bout avec plaque de support ☐
   – Soudage de tuyau ☐

Figure 7.22

Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle

PROCÉDURE DE SOUDAGE

N° de la procédure de soudage : **P1**

Soudage et assemblage-soudage

Normes applicables : **CSA W47.1**
CSA W59

PROCÉDÉ DE SOUDAGE :

- ☐ Pulsé
- ☐ Autre
- ■ Manuel (SMAW)
- ☐ Fil Fourré (FCAW)
- ☐ Fil Tubulaire (MCAW)
- ☐ Arc submergé (SAW)
- ☐ Arc sous protection gazeuse avec électrode de tungstène (GTAW)
- ☐ Fil plein (GMAW)

Classification du métal d'apport :
CSA W48-01
E4918

Gaz de protection ou flux :

MODE D'APPLICATION
- ■ Manuel
- ☐ Semi-automatique
- ☐ Automatique

Classification du tungstène :

Diamètre de la buse (mm) :

Température de préchauffage :

Diamètre de l'électrode de tungstène (mm) :

Longueur libre de l'électrode de tungstène (mm) :

Température min. entre les passes. :

Métal de base :
ACIER DOUX (ASTM-A36 CSA G40.21-44W)

Position de soudage :
À PLAT (1GF)

Température max. entre les passes. :

13
30°

PRÉPARATION DU JOINT

CÔTÉ 1
CÔTÉ 2
7 8 9 4 6 1 5 3 2

PASSES ET COUCHES

SOUDURE SUR PRÉPARATION À PÉNÉTRATION COMPLÈTE
- ☐ Soudage d'un côté sans support à l'envers
- ■ Soudage avec support à l'envers
- ☐ Gougeage à l'envers jusqu'au métal sain
- ☐ Soudage des deux côtés sans support à l'envers
- ☐ Soudage avec support à l'envers autre qu'en acier

- ☐ Purge ______________
- ☐ Soudure sur préparation à pénétration partielle
- ☐ Soudure d'angle

TYPE D'ASSEMBLAGE
- ■ Bout à bout
- ☐ En T
- ☐ En L
- ☐ Sur chant
- ☐ À recouvrement

Épaisseur du métal (mm)	Électrode	Dimensions de la soudure (mm)	N° du côté	N° des couches	N° des cordons	Diamètre de l'électrode ou de la baguette (mm)	Courant	Intensité ±10 %	Longueur terminale (mm) : Vitesse de dévidage : po/min	Vitesse de dévidage : mm/min	Transfert : Débit du gaz de protection : Tension (V)	Vitesse d'avance : po/min	Vitesse d'avance : mm/min
9,6	E4918	21±3	1	1-2-3	1 à 9	3,2	CCPI	140					

Explications – notes : ______________

3. Répondez aux questions suivantes à l'aide de la procédure de la figure 7.23.

   a) Quelles sont les limites minimales et maximales des dimensions de la soudure ?

   – Épaisseur : min. 1,6 mm et max. 1,6 mm ; largeur : min. 5,9 mm et max. 6,0 mm ☐
   – Épaisseur : min. 1,6 mm et max. 1,6 mm ; largeur : min. 5,0 mm et max. 6,0 mm ☐
   – Épaisseur : min. 0,6 mm et max. 1,6 mm ; largeur : min. 5,9 mm et max. 6,0 mm ☐
   – Épaisseur : min. 0,6 mm et max. 2,6 mm ; largeur : min. 5,0 mm et max. 6,0 mm ☐

   b) L'électrode recommandée est un alliage de tungstène et de zirconium ; quel est son code et pourquoi choisit-on cette électrode ?

   – AWS A5.12 ; parce que les alliages de zirconium sont recommandés pour le soudage de l'aluminium. ☐
   – EWZr-1 ; parce que c'est la plus économique. ☐
   – EWZr-1 ; parce que les alliages de zirconium sont recommandés pour le soudage de l'aluminium. ☐
   – AWS A5.12 ; parce qu'elle contient un flux qui permet au bain de fusion d'être moins fluide. ☐

   c) Quel est le type de courant prescrit et pourquoi ?

   – Le courant alternatif pulsé parce que c'est le plus efficace. ☐
   – Le courant alternatif haute fréquence parce qu'il permet un soudage plus rapide. ☐
   – Le courant alternatif haute fréquence parce que c'est le meilleur choix pour le soudage de l'aluminium. ☐
   – Le courant continu à polarité inversée parce que c'est le meilleur choix pour le soudage de l'aluminium. ☐

   d) Quel est le diamètre de la buse et de quoi dépend ce choix ?

   – 0,9 cm ; du nombre de cordons, de la longueur de l'arc, du procédé de soudage ☐
   – 9 mm ; de la longueur libre de l'électrode, du débit de gaz, du nombre de cordons ☐
   – 0,9 mm ; du procédé de soudage, de la norme utilisée, du type de joints ☐
   – 9 mm ; du diamètre de l'électrode, de l'intensité du courant, du type de joints ☐

   e) Quel gaz de protection doit-on utiliser et pourquoi ?

   – De l'argon ; il est essentiel d'utiliser un gaz inerte pour éviter l'oxydation. ☐
   – De l'argon, mais c'est optionnel ; il est essentiel d'utiliser un gaz inerte pour éviter qu'il explose. ☐
   – De l'argon ou de l'hélium parce que les deux se ressemblent. ☐
   – De l'argon et de l'hélium parce que la pièce est très épaisse. ☐

Figure 7.23

Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle

PROCÉDURE DE SOUDAGE

Nº de la procédure de soudage : **P2**

Soudage et assemblage-soudage

Normes applicables :

PROCÉDÉ DE SOUDAGE :

☐ Pulsé
☐ Autre
☐ Manuel (SMAW)
☐ Fil fourré (FCAW)
☐ Fil tubulaire (MCAW)
☐ Arc submergé (SAW)
■ Arc sous protection gazeuse avec électrode de tungstène (GTAW)
☐ Fil plein (GMAW)

Classification du métal d'apport : **ASME – AWS A5.10 ER4043**

Gaz de protection ou flux : **Argon**

MODE D'APPLICATION
■ Manuel
☐ Semi-automatique
☐ Automatique

Classification du tungstène : **AWS A5.12, EWZr-1 ZIRCONIUM**

Diamètre de la buse (mm) : **9**

Température de préchauffage :

Diamètre de l'électrode de tungstène (mm) : **2,4**

Longueur libre de l'électrode de tungstène (mm) : **6**

Température min. entre les passes :

Métal de base : **ALUMINIUM ALLIAGE 3105-H14**

Position de soudage : **HORIZONTALE (2F)**

Température max. entre les passes :

(1,6 x 6)

PRÉPARATION DU JOINT

PASSES ET COUCHES

SOUDURE SUR PRÉPARATION À PÉNÉTRATION COMPLÈTE
☐ Soudage d'un côté sans support à l'envers
☐ Soudage avec support à l'envers
☐ Gougeage à l'envers jusqu'au métal sain
☐ Soudage des deux côtés sans support à l'envers
☐ Soudage avec support à l'envers autre qu'en acier

☐ Purge

☐ Soudure sur préparation à pénétration partielle

■ Soudure d'angle

TYPE D'ASSEMBLAGE
☐ Bout à bout
☐ En T
☐ En L
☐ Sur chant
■ À recouvrement

Épaisseur du métal (mm)	Électrode	Dimension de la soudure (mm)	Nº du côté	Nº des couches	Nº des cordons	Diamètre de l'électrode ou de la baguette (mm)	Courant	Intensité ±10 %	Longueur terminale (mm) : / Vitesse de dévidage : po/min	mm/min	Transfert : / Débit du gaz de protection : **10 l/min** / Tension (V)	Vitesse d'avance : po/min	mm/min
1,6	1,6	4 $^{+0}_{-1}$	1	1-2-3	1	2,4	CA HF	90					
(calibre 14)													

Explications – notes :

4. Répondez aux questions suivantes à l'aide de la procédure de la figure 7.24.

   a) La longueur terminale recommandée est de 20 mm pour souder cette plaque de métal dont l'épaisseur est de 3,2 mm. Si l'épaisseur de la plaque était de 6,4 mm, que devrait-on faire avec la longueur terminale du fil ?

   - On diminuerait la longueur terminale du fil-électrode. ☐
   - On augmenterait la longueur terminale du fil-électrode. ☐
   - On ne changerait pas la longueur terminale du fil-électrode. ☐
   - Il est impossible de changer la longueur terminale parce qu'il n'y en a qu'une seule possible par type de fil-électrode. ☐

   b) Quelle est la position de soudage requise pour ce travail ?

   - À plat ☐
   - Horizontale ☐
   - Verticale ☐
   - Au plafond ☐

   c) Quel est le mode de transfert prescrit et pourquoi ?

   - Par court-circuit parce que c'est sécuritaire pour des soudures verticales. ☐
   - Par court-circuit parce que c'est le mode le plus rapide. ☐
   - Par pulvérisation axiale parce que c'est le mode de transfert le plus courant pour le soudage de métaux non ferreux. ☐
   - Par pulvérisation axiale parce que c'est le mode le plus économique. ☐

   d) Quel procédé particulier servira à réaliser cette soudure ?

   - MIG ☐
   - MAG ☐

Figure 7.24

Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle	**PROCÉDURE DE SOUDAGE**	Nº de la procédure de soudage : **P3**
	Soudage et assemblage-soudage	Normes applicables : **CSA W47.2** **CSA W59.2**

PROCÉDÉ DE SOUDAGE :
- ☐ Pulsé
- ☐ Autre
- ☐ Manuel (SMAW)
- ☐ Fil fourré (FCAW)
- ☐ Fil tubulaire (MCAW)
- ☐ Arc submergé (SAW)
- ☐ Soudage à l'arc sous gaz avec électrode de tungstène (GTAW)
- ■ Fil plein (GMAW)

Classification du métal d'apport : **AWS A5.10 ER4043**

Gaz de protection ou flux : **Argon**

MODE D'APPLICATION			
☐ Manuel ■ Semi-automatique ☐ Automatique	Classification du tungstène :	Diamètre de la buse (mm) :	Température de préchauffage :
	Diamètre de l'électrode de tungstène (mm) :	Longueur libre de l'électrode de tungstène (mm) :	Température min. entre les passes :

Métal de base : **ALUMINIUM ALLIAGE 3105-H14**	Position de soudage : **(3F)**	Température max. entre les passes :

PRÉPARATION DU JOINT

PASSES ET COUCHES

SOUDURE SUR PRÉPARATION À PÉNÉTRATION COMPLÈTE
- ☐ Soudage d'un côté sans support à l'envers
- ☐ Soudage avec support à l'envers
- ☐ Gougeage à l'envers jusqu'au métal sain
- ☐ Soudage des deux côtés sans support à l'envers
- ☐ Soudage avec support à l'envers autre qu'en acier

- ☐ Purge
- ☐ Soudure sur préparation à pénétration partielle
- ■ Soudure d'angle

TYPE D'ASSEMBLAGE
- ☐ Bout à bout
- ☐ En T
- ■ En L
- ☐ Sur chant
- ☐ À recouvrement

Longueur terminale (mm) : **20** — Transfert : **P-A** — Débit du gaz de protection : **18 l/min**

Épaisseur du métal (mm)	Électrode	Dimension de la soudure (mm)	Nº du côté	Nº des couches	Nº des cordons	Diamètre de l'électrode ou de la baguette (mm)	Courant	Intensité ±10 %	Vitesse de dévidage : po/min	Vitesse de dévidage : mm/min	Tension (V)	Vitesse d'avance : po/min	Vitesse d'avance : mm/min
3,2	ER 4043	5	1	1	1	0,9	CCPI	130			18-22	26-30	650-750

Explications – notes : ____________________

5. Répondez aux questions suivantes à l'aide de la procédure de la figure 7.25.

   a) Combien de cordons seront complétés pour réaliser cette soudure ?

   - 1 ☐
   - 2 ☐
   - 6 ☐
   - 9 ☐

   b) Quelle est la différence de dimension entre la première couche de soudure et la dernière ?

   - 9 mm ☐
   - 10 mm ☐
   - 14 mm ☐
   - 19 mm ☐

   c) Quel gaz de protection est utilisé et pourquoi ?

   - Le CO_2 ou un mélange d'argon et de CO_2 parce que ce sont des gaz peu coûteux. ☐
   - L'argon parce que c'est un gaz neutre et efficace. ☐
   - Un mélange d'argon et de CO_2 parce que c'est un mélange stable. ☐
   - Le CO_2 ou un mélange d'argon et de CO_2 parce que celui-ci est essentiel à l'utilisation du mode de transfert globulaire. ☐

   d) Quelle est la vitesse d'alimentation du fil-électrode ?

   - 6 980 à 7 080 mm/min ☐
   - Plus de 6 980 mm/min ☐
   - 275 à 375 mm/min ☐
   - Plus de 275 mm/min ☐

Figure 7.25

Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle

PROCÉDURE DE SOUDAGE

No de la procédure de soudage : **P4**

Soudage et assemblage-soudage

Normes applicables : **CSA W47.1**
CSA W59

PROCÉDÉ DE SOUDAGE :

☐ Pulsé
☐ Autre
☐ Manuel (SMAW)
■ Fil fourré (FCAW)
☐ Fil tubulaire (MCAW)
☐ Arc submergé (SAW)
☐ Arc sous protection gazeuse avec électrode de tungstène (GTAW)
☐ Fil plein (GMAW)

Classification du métal d'apport :
CSA W48.1-M
E491T-9-CH

Gaz de protection ou flux :
CO_2 ou 75 % Ar + 25 % CO_2

MODE D'APPLICATION
☐ Manuel
■ Semi-automatique
☐ Automatique

Classification du tungstène :

Diamètre de la buse (mm) :

Température de préchauffage :

Diamètre de l'électrode de tungstène (mm) :

Longueur libre de l'électrode de tungstène (mm) :

Température min. entre les passes. :

Métal de base :
ACIER DOUX (ASTM-A36, CSA G40.21-44W)

Position de soudage :
2F

Température max. entre les passes. :

19 19 19 19

PRÉPARATION DU JOINT

CÔTÉ 1 CÔTÉ 2 CÔTÉ 3 CÔTÉ 4
1 2 3 4 5 6

PASSES ET COUCHES

SOUDURE SUR PRÉPARATION À PÉNÉTRATION COMPLÈTE
☐ Soudage d'un côté sans support à l'envers
☐ Soudage avec support à l'envers
☐ Gougeage à l'envers jusqu'au métal sain
☐ Soudage des deux côtés sans support à l'envers
☐ Soudage avec support à l'envers autre qu'en acier

☐ Purge ____________

☐ Soudure sur préparation à pénétration partielle

■ Soudure d'angle

TYPE D'ASSEMBLAGE
☐ Bout à bout
■ En T
☐ En L
☐ Sur chant
☐ À recouvrement

Longueur terminale (mm) : **22**

Transfert : **Glob.**

Débit du gaz de protection : **18 l/min**

Épaisseur du métal (mm)	Électrode	Dimensions de la soudure (mm)	No du côté	No des couches	No des cordons	Diamètre de l'électrode ou de la baguette (mm)	Courant	Intensité ±10 %	Vitesse de dévidage : po/min	Vitesse de dévidage : mm/min	Tension (V)	Vitesse d'avance : po/min	Vitesse d'avance : mm/min
9,6	E491T-9-CH	9 ±1	1 à 4	1	1	1,6	CCPI	330	275-375	6980-9520	23-30	13-14	330-335
		14±1	1 à 4	2	2-3	1,6	CCPI	330	275-375	6980-9520	23-30	13-14	330-335
		19±1	1 à 4	3	4-5-6	1,6	CCPI	330	275-375	6980-9520	23-30	13-14	330-335

Explications – notes :

* Peut être utilisée avec du courant alternatif (CA).

** Peut être utilisée avec un branchement CCPI et du courant alternatif (CA).

6. Répondez aux questions suivantes à l'aide de la procédure de la figure 7.26.

a) Quelle doit être la méthode de gougeage utilisée pour la reprise à l'envers ?

- Gougeage mécanique au burin ☐
- Usinage ☐
- Oxycoupage ☐
- Gougeage à l'arc-air ☐

b) Quelle devra être l'épaisseur des soudures (1re - 2e) ?

- 5 - 6,4 ☐
- 6,4 - 5 ☐
- 6,4 - 1,4 ☐
- 5 - 1,4 ☐

c) Combien de cordons de soudure doivent être complétés à l'envers ?

- 1 ☐
- 2 ☐
- 3 ☐
- 4 ☐

d) Quel doit être le mode de transfert utilisé et pourquoi ?

- Globulaire, parce que c'est le mode le plus facile. ☐
- Globulaire, parce que ce mode permet une grande pénétration et un soudage rapide. ☐
- Globulaire, parce que ce mode est rapide et minimise les risques de projections. ☐
- Au choix, parce que l'acier se soude de toutes les façons. ☐

Figure 7.26

Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle

PROCÉDURE DE SOUDAGE

No de la procédure de soudage : **P5**

Soudage et assemblage-soudage

Normes applicables : **CSA W47.1**
CSA W59

PROCÉDÉ DE SOUDAGE :

- [ ] Pulsé
- [ ] Autre
- [ ] Manuel (SMAW)
- [ ] Fil fourré (FCAW)
- [x] Fil tubulaire (MCAW)
- [ ] Arc submergé (SAW)
- [ ] Arc sous protection gazeuse avec électrode de tungstène (GTAW)
- [ ] Fil plein (GMAW)

Classification du métal d'apport : **CSA W48.5 : E491T-9-CH**

Gaz de protection ou flux : **CO_2 ou 75 % Ar + 25 % CO_2**

MODE D'APPLICATION

- [ ] Manuel
- [x] Semi-automatique
- [ ] Automatique

Classification du tungstène :

Diamètre de la buse (mm) :

Température de préchauffage :

Diamètre de l'électrode de tungstène (mm) :

Longueur libre de l'électrode de tungstène (mm) :

Température min. entre les passes. :

Métal de base : **ACIER DOUX (ASTM-A36, CSA G40.21-44W)**

Position de soudage : **2G**

Température max. entre les passes. :

5 AAC
6,4 70°

PRÉPARATION DU JOINT

CÔTÉ 1 1 2
CÔTÉ 2 3

PASSES ET COUCHES

SOUDURE SUR PRÉPARATION À PÉNÉTRATION COMPLÈTE

- [ ] Soudage d'un côté sans support à l'envers
- [ ] Soudage avec support à l'envers
- [x] Gougeage à l'envers jusqu'au métal sain
- [ ] Soudage des deux côtés sans support à l'envers
- [ ] Soudage avec support à l'envers autre qu'en acier

- [ ] Purge
- [ ] Soudure sur préparation à pénétration partielle
- [ ] Soudure d'angle

TYPE D'ASSEMBLAGE

- [x] Bout à bout
- [ ] En T
- [ ] En L
- [ ] Sur chant
- [ ] À recouvrement

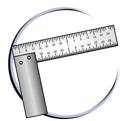
Longueur terminale (mm) : **20**

Transfert : **Glob.**

Débit du gaz de protection : **18 l/min**

Épaisseur du métal (mm)	Électrode	Dimension de la soudure (mm)	No du côté	No des couches	No des cordons	Diamètre de l'électrode ou de la baguette (mm)	Courant	Intensité ±10 %	Vitesse de dévidage : po/min	Vitesse de dévidage : mm/min	Tension (V)	Vitesse d'avance : po/min	Vitesse d'avance : mm/min
9,6	E491T-9-CH	------	1	1-2	1-2	1,2	CCPI	250	400-450	10 160-11 430	26-30	9-11	230-280
		------	2	3	3	1,2	CCPI	250	400-450	10 160-11 430	26-30	9-11	230-280

Explications – notes : ____________________



Symboles d'assemblage

Différents symboles reliés à l'assemblage des pièces apparaissent aussi sur les plans. On en distingue trois types :

– les symboles géométriques (figure 7.27) :
  - de forme,
  - de profil,
  - d'orientation,
  - de position,
  - de battement ;

– les symboles de référence (figure 7.28).

Figure 7.27 Symboles géométriques de plan d'assemblage

Catégorie	Symbole	Signification
Symboles de forme	⏤	Rectitude
	⏥	Planéité
	○	Circularité
	⌭	Cylindricité
Symboles de profil	⌒	Profil de ligne
	⌓	Profil de surface



Figure 7.27 Symboles géométriques de plan d'assemblage (suite)

Catégorie	Symbole	Signification
Symboles d'orientation	ou INCL	Inclinaison
		Perpendicularité
		Parallélisme
Symboles de position		Positionnement
Symboles de battement		Concentricité (ou coaxialité)*
		Symétrie*
		Battement circulaire**
		Battement total**

* La concentricité ou la symétrie peuvent aussi être indiquées par une tolérance de positionnement.
** Les flèches des symboles de battement peuvent aussi être pleines (noircies).

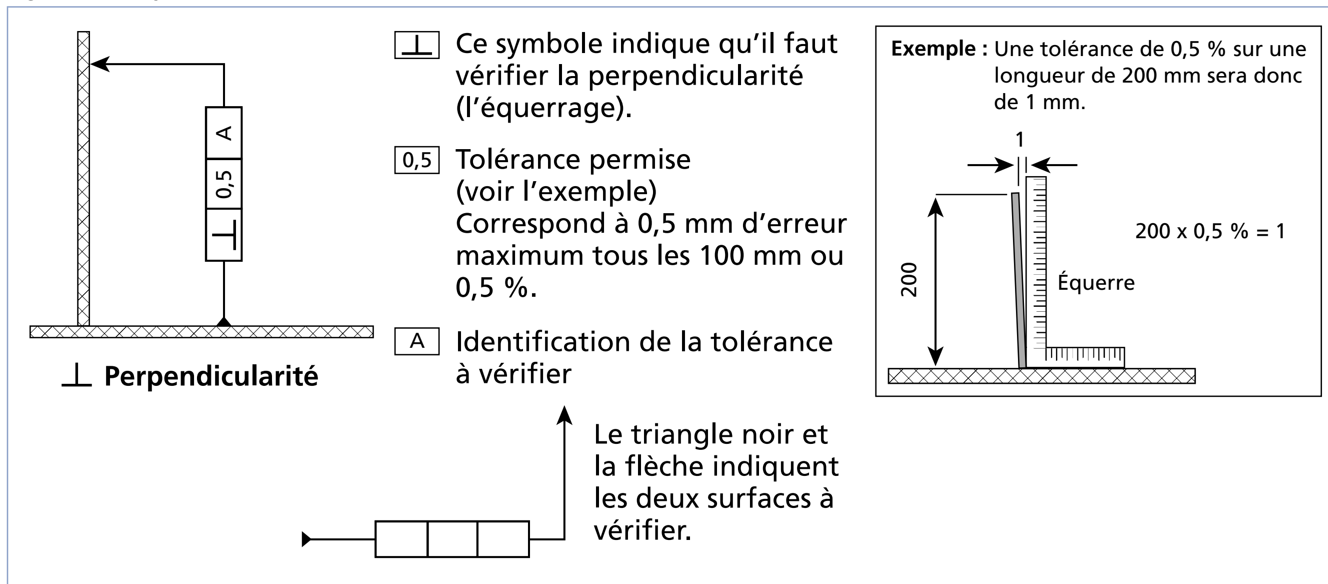
Figure 7.28 Symboles de référence de plan d'assemblage

Symbole	Signification
A A	Symbole d'élément de référence
20 × 20; A1; B2; Ø6 A1	Référence partielle
	Référence partielle point
ou	Référence partielle ligne
Limite de zone (trait fort)	Référence partielle zone

Les symboles géométriques d'assemblage sont présentés dans de petits carrés indiquant la référence et la tolérance admise.

Sur la figure 7.29, on retrouve le symbole de perpendicularité (ou d'équerrage) qui indique que les pièces doivent être à 90° l'une par rapport à l'autre. La tolérance est exprimée en pourcentage de déviation permise.

Figure 7.29 Symbole et tolérance



Autres informations présentes sur les plans

Hormis les symboles, on retrouve sur les plans toutes les informations relatives aux dimensions de l'assemblage. La lettre R, suivie d'un nombre, indique la valeur du rayon d'un cercle ou d'un arc de cercle (par exemple, R10 signifie un rayon de 10 mm).

Sur certains plans, les mesures sont données dans les deux systèmes de mesures, soit en pouces avec l'équivalent en millimètres entre parenthèses ou inversement.

La figure 7.30 présente des symboles utilisés pour désigner les matériaux.

Figure 7.30 Symboles relatifs aux matériaux utilisés

Symbole	Signification
STL	Acier (*steel*)
MS	Acier doux (*mild steel*)
SS	Acier inoxydable (*stainless steel*)
HRS	Acier roulé à chaud (*hot rolled steel*)
CRS	Acier roulé à froid (*cold rolled steel*)
CI	Fonte (*cast iron*)
GALV	Galvanisé
L	Cornière
W	Poutre d'acier en H
AL	Aluminium
HSS	Structure creuse en acier (*hollow steel-structure*)

D'autres symboles divers apparaissent à la figure 7.31.

Figure 7.31 Autres symboles d'assemblage

Symbole	Signification	Symbole	Signification	Symbole	Signification
DES ou DWG	Dessin (*drawing*)	Fig. ou FIG	Figure	P	Pas (*pitch*)
DIM	Dimension	HEX	Hexagonal	Pl	Plaque
LM	Ligne de mesure	JA ou GA	Jauge (*gauge*)	Ø ou DIA	Diamètre
LG ou lg	Longueur	BUSH	Manchon	DE ou OD	Diamètre extérieur



Figure 7.31 Autres symboles d'assemblage (suite)



Symbole	Signification	Symbole	Signification	Symbole	Signification
RÉF	Référence	NOM	Nominal	DI ou ID	Diamètre intérieur
SECT	Section	NAE ou NTS	Non à l'échelle (*not to scale*)	R	Rayon
TOL	Tolérance	Pc	Pièce	CIRC	Circonférence
STD	Régulier (*standard*)	THD	Filet (*thread*)		
ML	Liste de matériel	NC	Gros filet (*national coarse*)	MAX	Maximum
S.I.C.	Sauf indication contraire	NF	Filet fin (*national fine*)	MIN	Minimum
BP	*Blueprint*	CP	Pénétration complète	ÉL	Élévation
₵	Ligne centrale	Jt	Joint	A/A	Axe en axe
@	Relie deux chiffres (ex. : deux mesures).	FLG	Bride (*flange*)	C/C	Centre à centre
G ou LH	Main gauche* (côté gauche)	D ou RH	Main droite (côté droit)		

* Si une pièce est fabriquée, celle que l'on verrait dans un miroir serait opposée ou à la main gauche.

Sur les plans, on trouve aussi la source de la codification utilisée. La CSA (ou Association canadienne de normalisation) est responsable de l'approbation des codifications au Canada, tandis que l'ANSI (*American National Standards Institute*) joue le même rôle aux États-Unis ; à noter que cette norme est aussi utilisée au Canada.



Exercice 7.4

1. Associez les symboles ou les codes d'assemblage suivants à leur signification.

Figure 7.32

Définitions ou illustrations		Signification
a) CIRC	☐	1. Symétrie
b) ℄	☐	2. Tolérance
c) ⌭	☐	3. Acier roulé à froid
d) CRS	☐	4. Cylindricité
e) A A	☐	5. Longueur
f) TOL	☐	6. Circonférence
g)	☐	7. Inclinaison
h) ⌒	☐	8. Ligne centrale
i)	☐	9. Profil de ligne
j) LG	☐	10. Élément de référence

2. Répondez aux questions suivantes à partir du plan de la figure 7.33.

   a) Quel paramètre indique le code R3.00 ?

   - Il indique le rayon du tuyau en pouces. ☐
   - Il indique le rayon de la courbe D en pouces. ☐
   - Il indique le rayon de la courbe D en millimètres. ☐
   - Il indique le rayon du tuyau en millimètres. ☐

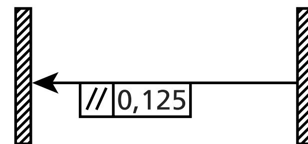
   b) Quel est le rayon du cercle E en mm ?

   - 0,44 mm ☐
   - 0,75 mm ☐
   - 11 mm ☐
   - 19 mm ☐

   c) Quelle est la tolérance permise pour l'équerrage (F) ?

   - 0,125° ☐
   - 0,125 po/100 po ou 0,125 % ☐
   - 0,125 % de 90° ☐

   d) Comment doivent être disposées les pièces reliées par le symbole repris ci-dessous (G) ?

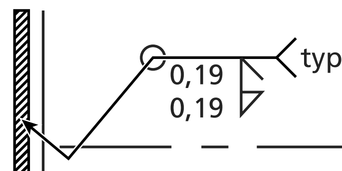


   - À un angle de 0,125° avec une déviation de 1,25 % ☐
   - À une distance de 0,125 po ±1,2 % ☐
   - Parallèles avec une déviation maximale de 0,125 po/100 po ou 0,125 % ☐
   - À un angle de 0,125° avec une déviation de 0,125 % ☐
   - Parallèles avec une déviation de ±0,125° ☐

   e) Quelle méthode doit-on utiliser pour effectuer le coupage après le cintrage (H) ?

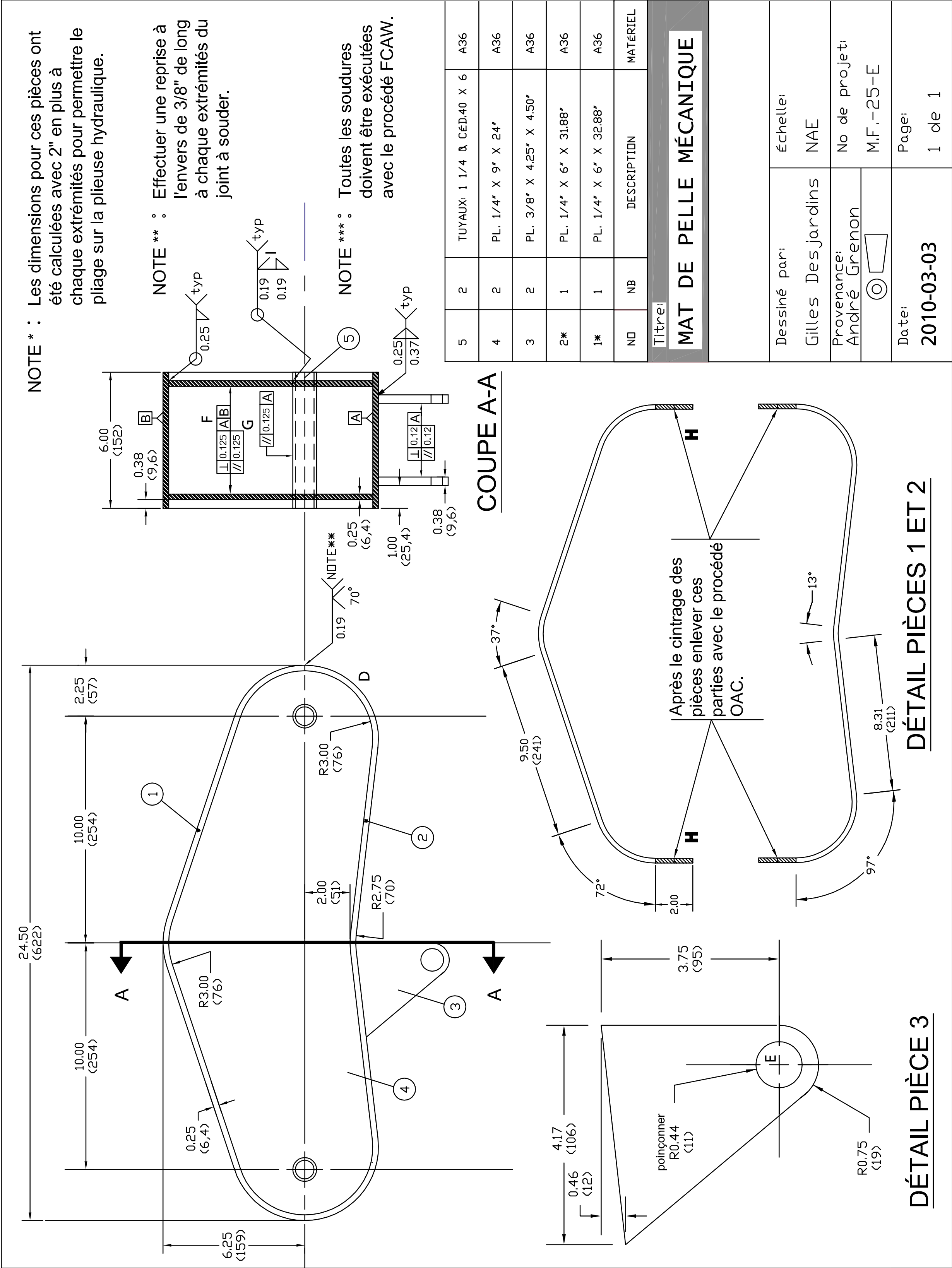
   - Coupe au jet de plasma ☐
   - Coupage à l'arc ☐
   - Oxycoupage ☐

   f) Que signifie ce symbole de soudure présent en I sur le plan ?



   - Soudure d'angle sur préparation en demi-V double de 0,19 po de grosseur ☐
   - Soudure d'angle sur préparation en demi-V de 0,19 po de diamètre ☐
   - Soudure d'angle sur préparation en demi-V double de 0,19 po de grosseur effectuée tout autour ☐
   - Soudure d'angle sur préparation en demi-V de 0,19 po de grosseur effectuée tout autour ☐

Figure 7.33


NOTE * : Les dimensions pour ces pièces ont été calculées avec 2" en plus à chaque extrémités pour permettre le pliage sur la plieuse hydraulique.
NOTE ** : Effectuer une reprise à l'envers de 3/8" de long à chaque extrémités du joint à souder.
NOTE *** : Toutes les soudures doivent être exécutées avec le procédé FCAW.
NO | NB | DESCRIPTION | MATÉRIEL
5 | 2 | TUYAUX: 1 1/4 Ø CÉD.40 X 6 | A36
4 | 2 | PL. 1/4" X 9" X 24" | A36
3 | 2 | PL. 3/8" X 4.25" X 4.50" | A36
2* | 1 | PL. 1/4" X 6" X 31.88" | A36
1* | 1 | PL. 1/4" X 6" X 32.88" | A36
Titre: MAT DE PELLE MÉCANIQUE
Dessiné par: Gilles Desjardins
Échelle: NAE
Provenance: André Grenon
No de projet: M.F.-25-E
Date: 2010-03-03
Page: 1 de 1
COUPE A-A
NOTE**
DÉTAIL PIÈCES 1 ET 2
Après le cintrage des pièces enlever ces parties avec le procédé OAC.
DÉTAIL PIÈCE 3
poinçonner R0.44 (11)
R0.75 (19)
24.50 (622)
10.00 (254)
2.25 (57)
6.25 (159)
R3.00 (76)
R2.75 (70)
2.00 (51)
0.25 (6,4)
6.00 (152)
0.38 (9,6)
1.00 (25,4)
9.50 (241)
8.31 (211)
3.75 (95)
4.17 (106)
0.46 (12)
37°
72°
97°
13°
70°

3. Répondez aux questions suivantes à partir du plan de la figure 7.34.

a) Si la pièce est fixe, quelles positions de soudage seraient associées aux soudures A et B ?

- A : verticale montante ; B : à plat ☐
- A : verticale montante ; B : horizontale ☐
- A : à plat horizontale ; B : verticale montante ☐
- A : horizontale ; B : plafond ☐

b) Quelle soudure doit être exécutée à l'aide du procédé GTAW ?

- A et C ☐
- B ☐
- A et F ☐
- Aucune ☐
- Toutes ☐

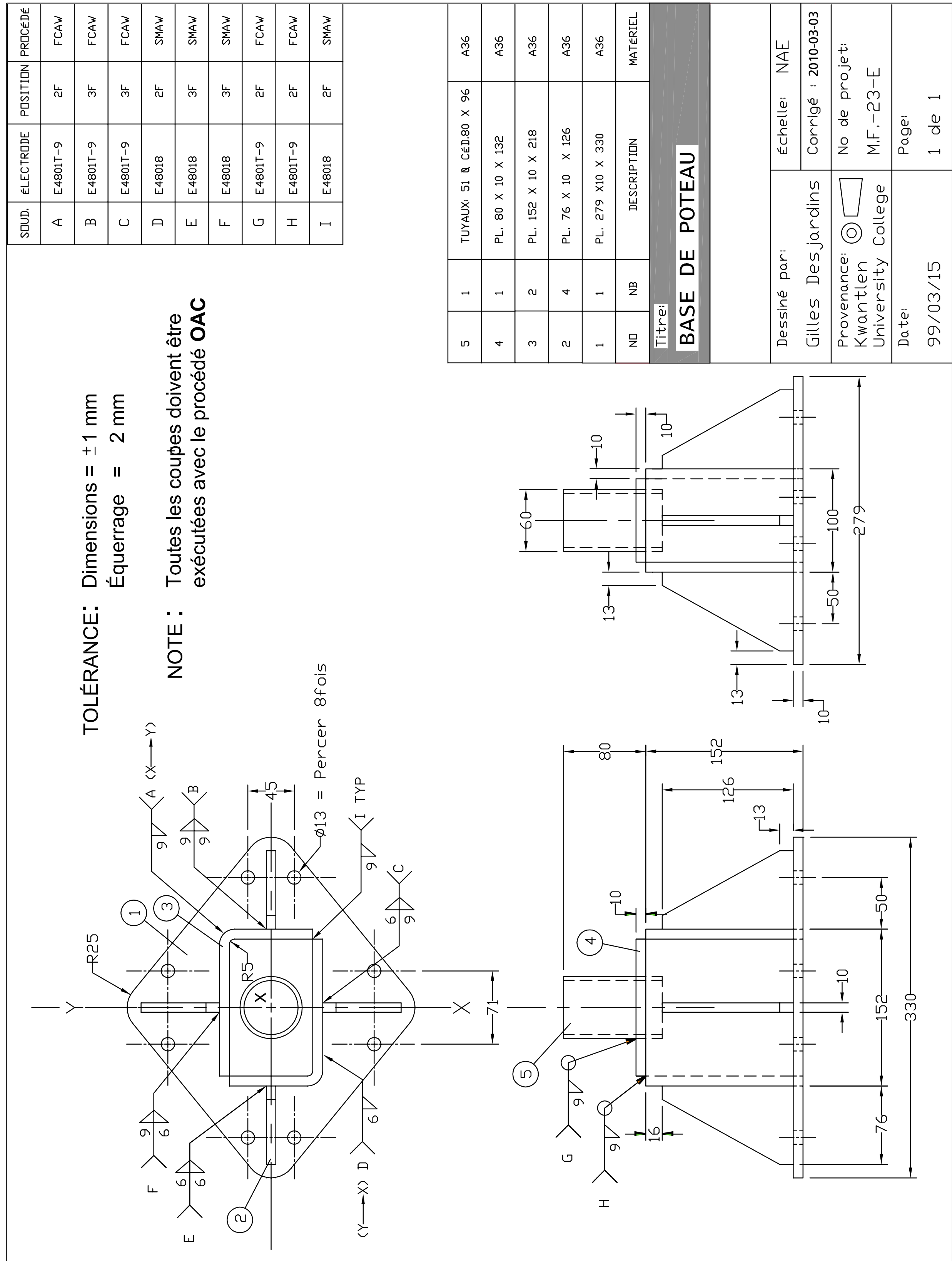
c) Quel est le rayon du cercle au centre (X) ?

- 5 po ☐
- 5 mm ☐
- 50 mm ☐
- 0,5 po ☐

d) Quelle est la hauteur totale de la structure ?

- 152 mm ☐
- 232 mm ☐
- 279 mm ☐
- 330 mm ☐

Figure 7.34



SOUD. | ÉLECTRODE | POSITION | PROCÉDÉ
A | E4801T-9 | 2F | FCAW
B | E4801T-9 | 3F | FCAW
C | E4801T-9 | 3F | FCAW
D | E48018 | 2F | SMAW
E | E48018 | 3F | SMAW
F | E48018 | 3F | SMAW
G | E4801T-9 | 2F | FCAW
H | E4801T-9 | 2F | FCAW
I | E48018 | 2F | SMAW
5 | 1 | TUYAUX: 51 Ø CÉD.80 X 96 | A36
4 | 1 | PL. 80 X 10 X 132 | A36
3 | 2 | PL. 152 X 10 X 218 | A36
2 | 4 | PL. 76 X 10 X 126 | A36
1 | 1 | PL. 279 X10 X 330 | A36
NO | NB | DESCRIPTION | MATÉRIEL
TOLÉRANCE: Dimensions = ±1 mm
Équerrage = 2 mm
NOTE : Toutes les coupes doivent être exécutées avec le procédé OAC
Titre: BASE DE POTEAU
Dessiné par: Gilles Desjardins
Échelle: NAE
Corrigé : 2010-03-03
Provenance: Kwantlen University College
No de projet: M.F.-23-E
Date: 99/03/15
Page: 1 de 1
Ø13 = Percer 8fois
I TYP
R25
R5
A (X—Y)
(Y—X) D

Résumé

- On retrouve les travaux de soudage codifiés sur les plans d'assemblage des pièces.
- Un plan d'assemblage est constitué de deux parties : le plan proprement dit et le cartouche. Le plan comprend le dessin, les symboles de soudage et des instructions d'assemblage, tandis que le cartouche inclut toutes les informations connexes à la réalisation du plan, la projection, l'identification du créateur ou du propriétaire du plan, etc.
- Les symboles de soudage sont multiples et on peut les combiner de diverses façons. Il est donc très important de se souvenir des différents symboles, des valeurs de mesures associées et de l'ordre dans lequel ils doivent être placés.
- Les symboles de soudure et d'assemblage sont toujours présents sur un plan. Il faut savoir les identifier afin d'accomplir adéquatement le travail demandé.

Notes

Chapitre 8

TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE : TRAÇAGE ET DÉVELOPPEMENT DE PATRONS

Ce chapitre porte sur deux techniques propres à l'assemblage-soudage, soit le traçage des pièces et le développement de patrons.

Traçage de lignes et de points de référence sur les pièces

Les lignes et les points de référence doivent être déterminés avant le traçage proprement dit. Les références servent à assurer la cohérence du traçage afin qu'il respecte un cadre établi en terme de dimension et de localisation. Ces lignes ou points de référence permettront de bien situer les axes principaux des dessins. Les axes secondaires et les détails plus pointus seront orientés autour des axes principaux. La méthode permet de bien cerner les formes à tracer de façon à éviter les erreurs.

Très souvent, on utilise une règle ou un réglet de différentes dimensions pour tracer les pièces. Les règles ou réglets sont généralement fabriqués à partir de matériaux présents dans l'usine, par exemple, une feuille de métal coupée ou une barre d'aluminium (*flat bar*). Dans ce cas, on prend les mesures à l'aide d'un ruban à mesurer.

Il existe cependant quelques instruments de traçage spécialisés que l'on peut utiliser.

La figure 8.1 présente diverses techniques de traçage utilisées en soudage.

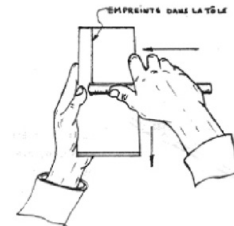
Figure 8.1 Techniques de traçage

Traçage au trusquin
Le trusquin est un outil servant à tracer des lignes parallèles au bord d'une tôle. Il se compose d'une tige de métal graduée, munie d'une petite pointe à tracer. Une butée ajustable s'insère sur la tige.



Figure 8.1 Techniques de traçage (suite)

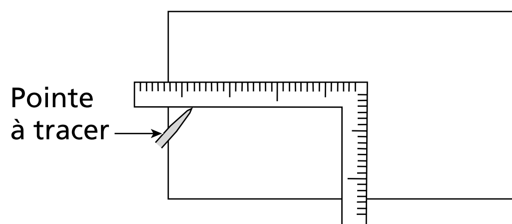


Traçage au trusquin (suite)	
Tenir le trusquin tel que démontré ici.	
Appuyer la butée sur le bord de la tôle et tirer vers soi, en maintenant une pression sur la butée. La pointe entaille le métal et laisse son empreinte dans la tôle.	
Il est très important de maintenir la pointe inclinée dans le sens du mouvement lors du traçage.	

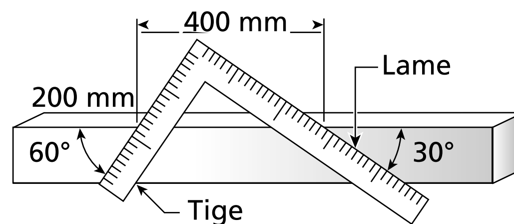
Traçage à l'équerre de charpente (lignes droites et angles)

L'équerre de charpente peut être utilisée pour effectuer le traçage de lignes droites et d'angles droits sur une plaque (A). On peut également utiliser cette équerre pour tracer tous les angles de 0 à 90° (B).

A) Traçage d'un rectangle

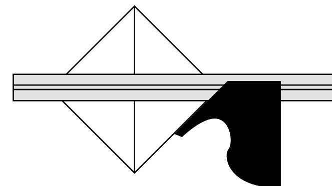


B) Traçage d'angles



Traçage à l'équerre à 45°

L'équerre à 45° permet de tracer des lignes parallèles et perpendiculaires à 45° par rapport au bord de la pièce. On peut aussi l'utiliser pour trouver le centre d'une pièce carrée.



Traçage au rapporteur d'angles et au V à centrer

Le rapporteur d'angles permet de tracer des lignes suivant n'importe quel angle sur une pièce.

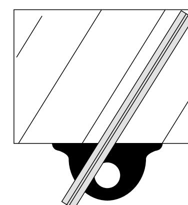


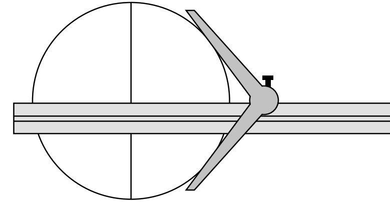


Figure 8.1 Techniques de traçage (suite)



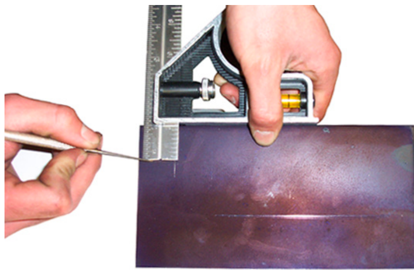
Traçage au rapporteur d'angles et au V à centrer (suite)

Le V à centrer est utile pour trouver rapidement le centre d'une pièce ronde ou pour tracer, sur une pièce à l'équerre, des lignes de chaque côté sans bouger la pièce.

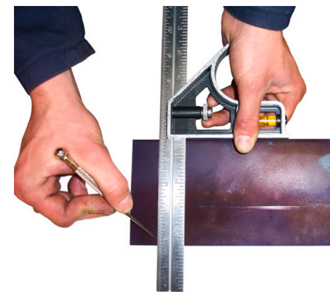


Traçage à l'équerre combinée

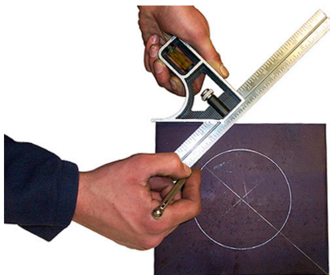
L'équerre combinée est très polyvalente et convient à de multiples utilisations.



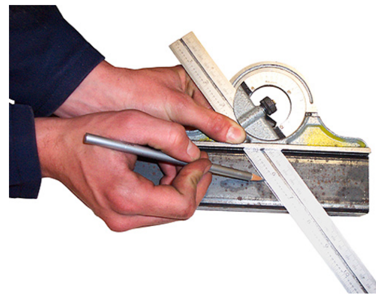
Utilisation de l'équerre combinée pour tracer des lignes parallèles



Utilisation de l'équerre combinée pour tracer des lignes d'axe (L'intersection des deux lignes détermine le centre du trou à percer.)



Traçage d'un angle avec le rapporteur d'angles de l'équerre combinée



Traçage d'une queue d'aronde sur une pièce



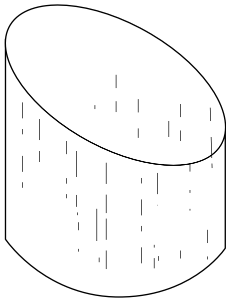
Détermination du centre d'une pièce cylindrique avec l'équerre à centrer

Développement de patrons

Le développement par lignes parallèles est la méthode la plus simple permettant de tracer les pièces qu'on rencontre fréquemment dans les ateliers de métal en feuille, par exemple les tés, les coudes, les joints en Y, etc. Dans l'ensemble, toutes les pièces de forme cylindrique peuvent être développées à l'aide de cette méthode.

Cette section présente le développement de coudes à deux et à trois sections, d'un té et d'un joint en Y. Cependant, il est essentiel de bien connaître le développement d'une pièce cylindrique d'abord (figure 8.2).

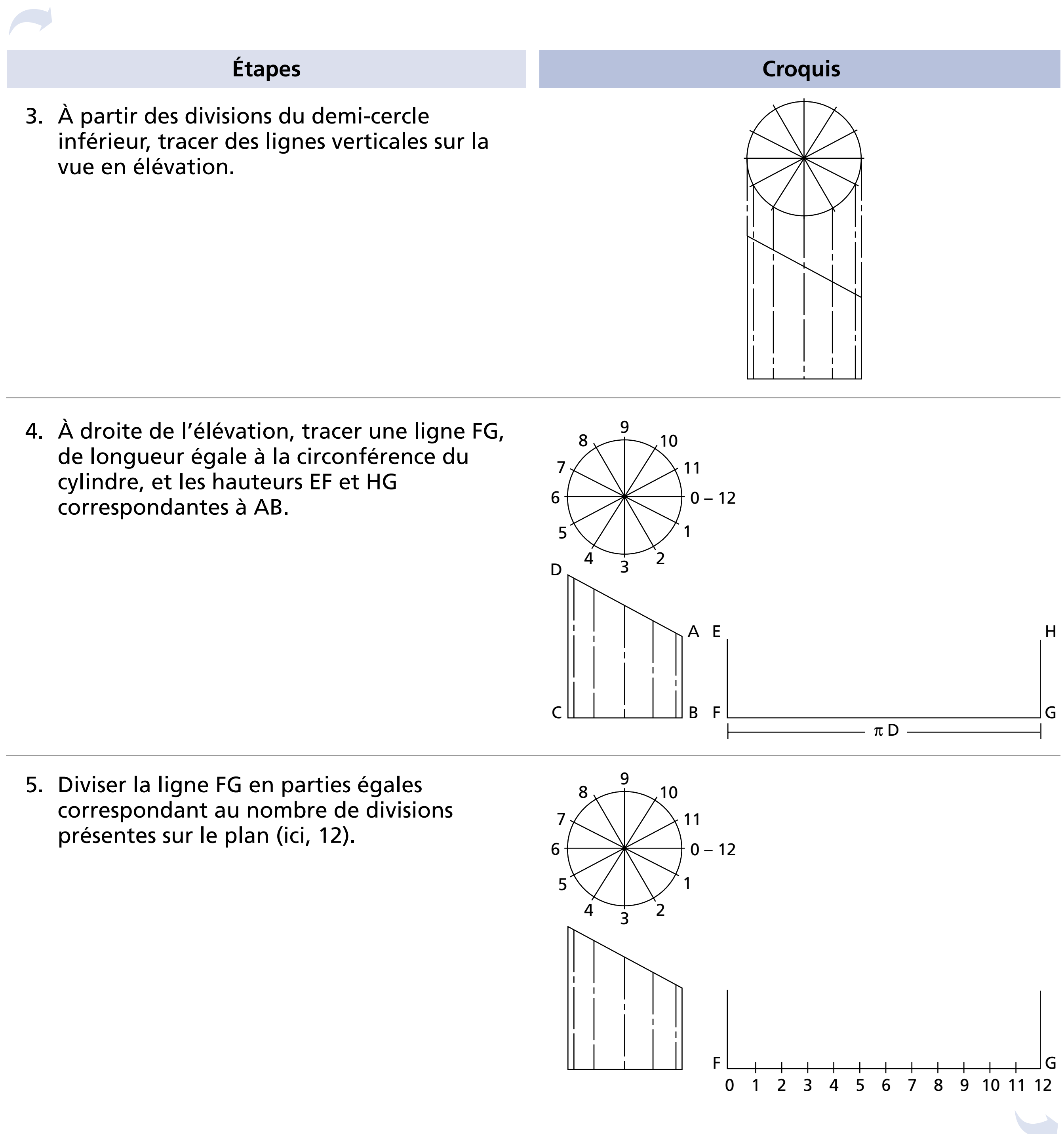
Figure 8.2 Étapes de développement d'un cylindre



Les pièces cylindriques les plus utiles sont les cylindres tronqués.

Étapes	Croquis
1. Dessiner la vue en élévation et la vue en plan du cylindre.	
2. Diviser la circonférence en parties égales. Choisir, de préférence, un nombre divisible par 4. Le nombre de subdivisions dépend du degré de précision requis.	9 8 10 7 11 6 0 – 12 5 1 4 2 3

Figure 8.2 Étapes de développement d'un cylindre (suite)



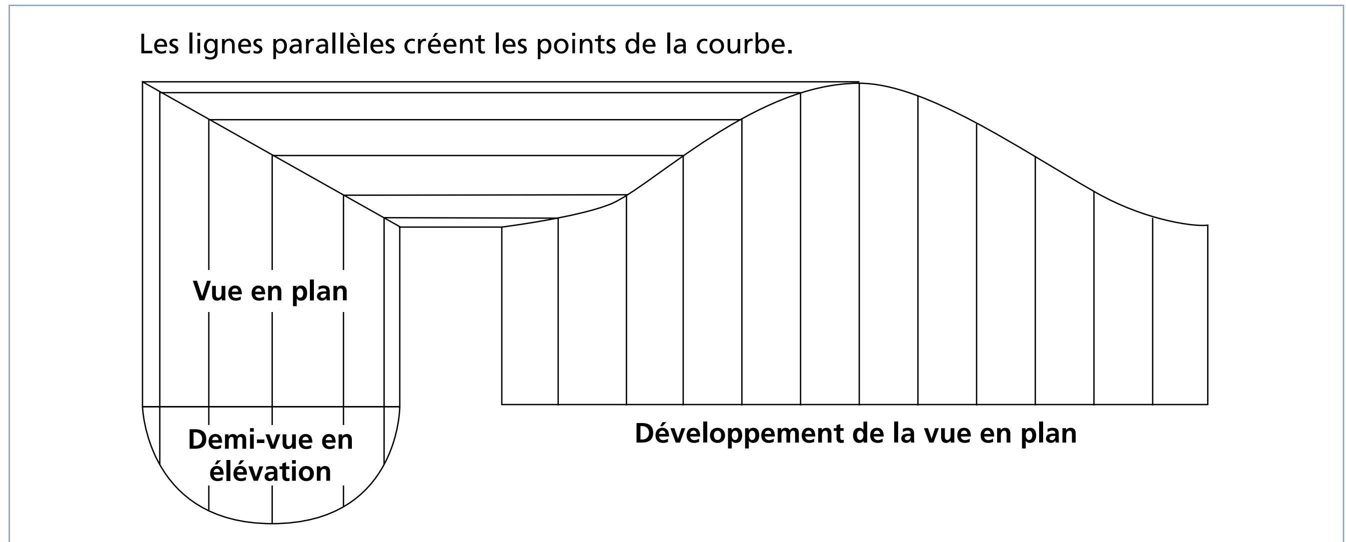
Étapes	Croquis
3. À partir des divisions du demi-cercle inférieur, tracer des lignes verticales sur la vue en élévation.	
4. À droite de l'élévation, tracer une ligne FG, de longueur égale à la circonférence du cylindre, et les hauteurs EF et HG correspondantes à AB.	
5. Diviser la ligne FG en parties égales correspondant au nombre de divisions présentes sur le plan (ici, 12).	

Figure 8.2 Étapes de développement d'un cylindre (suite)

Étapes	Croquis
6. Tracer des lignes verticales sur chacun des points de division de la ligne FG.	
7. Projeter les éléments du cylindre de la vue en élévation sur le développement et joindre les points par une courbe aussi régulière que possible.	

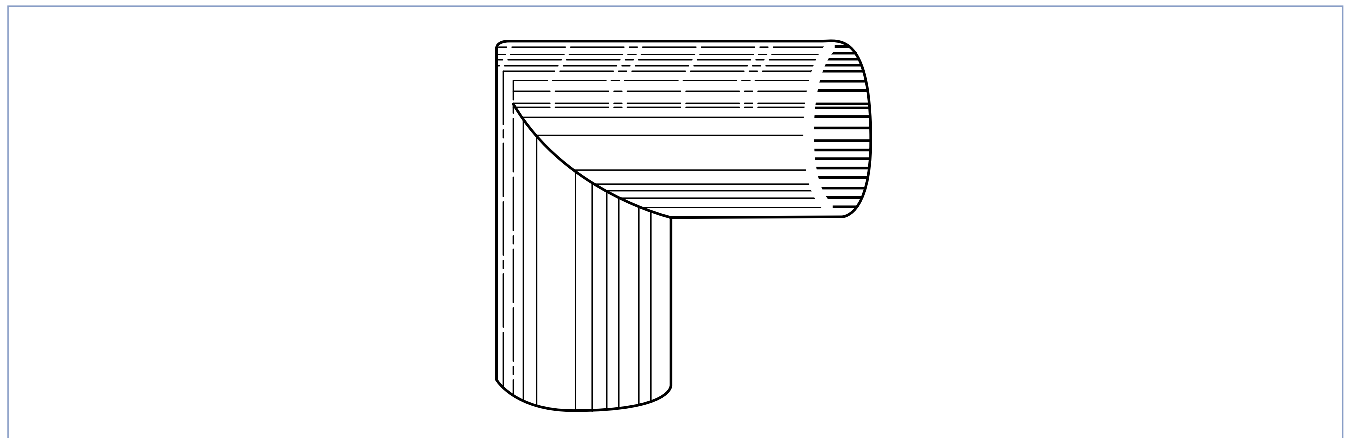
Pour gagner du temps, il est possible de ne tracer qu'un demi-plan au-dessous de la pièce (figure 8.3).

Figure 8.3 Développement rapide d'un cylindre tronqué



Un coude à deux sections est constitué de deux cylindres tronqués de même diamètre (figure 8.4). Une fois la technique de développement maîtrisée, il est alors possible d'établir le patron d'un coude.

Figure 8.4 Coude à deux pièces



Pour un coude à trois sections, il s'agit en plus de développer la partie centrale (figure 8.5).

Figure 8.5 Étapes de développement d'un coude à trois pièces

Étapes	Croquis
1. Dessiner la vue en élévation et la vue en plan des parties à développer, soit la partie centrale dans ce cas-ci.	
2. Diviser la circonférence en un nombre de parties égales, comme pour le cylindre tronqué.	
3. À partir des divisions du demi-cercle inférieur, tracer des lignes verticales sur la vue en élévation.	
4. À partir des points d'intersection, tracer des parallèles aux côtés DE et CF.	
5. Tracer une ligne de centre OO' sur le coude, en divisant en deux l'angle formé par les prolongements des côtés CD et EF.	
6. Tracer, pour le développement, cette ligne de centre OO', de longueur égale à la circonférence du coude, puis la diviser en un nombre de parties égales comme sur le plan (ici, 12).	
7. Mesurer la distance entre OO' et CD en chaque point de la première moitié (ici, 1 à 6) et reporter ces mesures sur la ligne de centre nécessaire pour le développement (la mesure à 12 = la mesure à 0, la mesure à 11 = la mesure à 1, etc.).	

La partie supérieure (entre OO' et EF) est similaire à la partie inférieure; les dimensions sont identiques.

Par contre, on développe les tés en insérant un cylindre dans un autre. On développe d'abord le raccord vertical, puis l'ouverture dans le conduit principal (figure 8.6).

Figure 8.6 Étapes de développement d'un té

Développement du raccord vertical

Étapes	Croquis
1. Diviser la circonférence de la vue en parties égales (12 ou 16).	Élévation Profil Développement de la partie supérieure
2. Tracer des lignes verticales sur l'élévation et numéroter chaque ligne avec des numéros de division sur la circonférence.	
3. Tracer une ligne AB égale à la circonférence du cercle.	
4. Diviser cette ligne AB en 16 parties égales (comme pour la circonférence).	
5. À partir de cette ligne AB, descendre des lignes d'élévation à chaque division.	
6. À partir de chaque numéro de l'élévation, tracer une ligne vers la droite pour rejoindre la ligne verticale correspondant au même numéro.	
7. Relier toutes les intersections entre elles, ce qui devrait donner une courbe similaire à celle de droite.	

Développement de l'ouverture dans le conduit principal

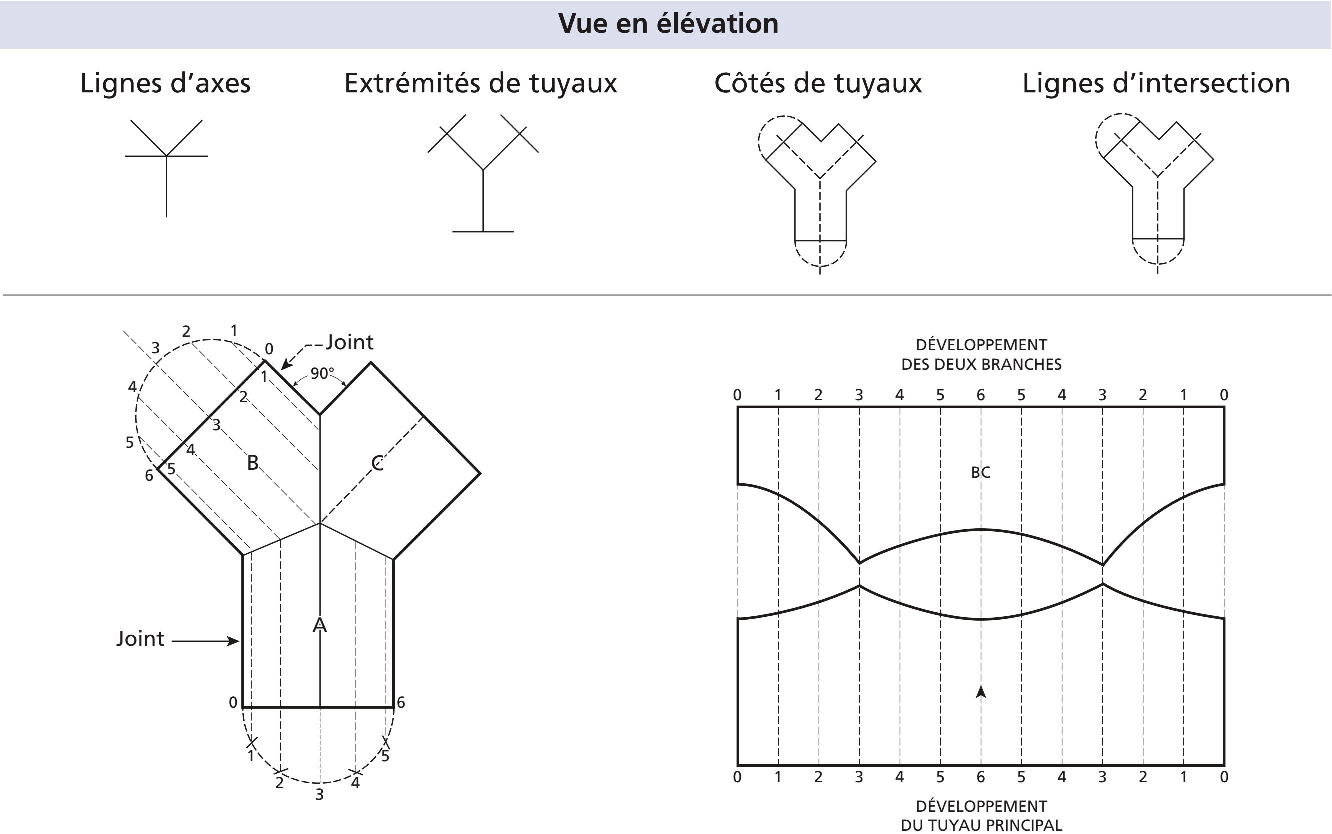
Ici, la circonférence de la vue en élévation est déjà divisée en parties égales.

Étapes	Croquis
1. Tracer, au dessus de l'élévation, un rectangle égal à la circonférence (D) du conduit principal.	Développement du conduit principal
2. Diviser ce rectangle en lignes horizontales espacées également d'une distance équivalente à une division de la circonférence.	
3. Numéroter ces lignes avec les mêmes chiffres que ceux utilisés sur l'élévation.	
4. À partir de l'élévation, monter des lignes verticales qui vont couper les lignes horizontales du plan développé.	
5. Identifier les points de rencontre des mêmes numéros.	
6. Relier ces points de rencontre entre eux, ce qui devrait donner une courbe ovale comme celle de droite.	

Quant au Y, il s'agit d'un tuyau cylindrique qui se divise en deux branches de même diamètre et formant un angle de 90° l'une par rapport à l'autre. Faute d'indication contraire, chaque branche fait un angle de 45° avec le conduit principal. Un schéma sommaire du développement du joint en Y est présenté à la figure 8.7.

Figure 8.7 Schéma de développement d'un joint en Y

Les deux branches étant identiques, le même développement sera utilisé.





Exercice 8.1

1. Associez les fonctions des instruments de traçage aux instruments correspondants.

Figure 8.8

Fonctions		Instruments de traçage
a) Outil très polyvalent convenant à de multiples utilisations.	☐	1. Trusquin
b) Tracer des lignes à 45° par rapport au bord d'une pièce et trouver le centre d'une pièce carrée.	☐	2. Équerre de charpente
c) Trouver le centre d'une pièce circulaire.	☐	3. Équerre à 45°
d) Tracer des lignes droites ainsi que des angles de 90° ou complémentaires.	☐	4. Rapporteur d'angles
e) Tracer des lignes parallèles au bord d'une pièce.	☐	5. V à centrer
f) Tracer des lignes suivant différents angles sur une pièce.	☐	6. Équerre combinée

2. Quelles pièces, parmi les suivantes, peuvent être développées par la méthode des lignes parallèles ?

   a) Des cylindres tronqués ☐
   b) Des sphères ☐
   c) Des joints en Y ☐
   d) Des joints en T ☐
   e) Des coudes à trois sections ☐
   f) Des prismes ☐

3. L'utilisation d'un plus grand nombre de points pour diviser la circonférence d'une pièce influe sur quel facteur ?

   a) L'économie de matériel ☐
   b) La taille de la pièce ☐
   c) La précision ☐
   d) La couleur ☐

4. Dans le développement d'un cylindre tronqué, qu'est-ce qui correspond à la longueur du développement ?

   a) Le diamètre du cylindre ☐
   b) La hauteur du cylindre ☐
   c) Le rayon du cylindre ☐
   d) La circonférence du cylindre ☐

Résumé

- Les activités d’assemblage impliquent aussi l’élaboration de patrons et de modèles, entre autres à partir du développement par lignes parallèles. Cette méthode est rapide et s’applique à toutes les formes cylindriques, notamment les tuyaux.
- Le traçage des pièces proprement dit doit être précédé du traçage des lignes et des points de référence qui serviront à préciser le cadre de la pièce. Ceux-ci sont essentiels pour assurer la position et la précision de la taille des éléments à tracer.

Notes


Annexes

Bibliographie

BUREAU CANADIEN DE SOUDAGE, *Assemblage, terminologie, lecture de plans et préparation de joints*, module 2, 1987, 128 p.

BUREAU CANADIEN DE SOUDAGE, *Déformations et contraintes résiduelles dues au soudage*, module 7, 1986, 57 p.

CEMEQ, *Application de notions de métallurgie*, module 4, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2005, 172 p.

CEMEQ, *Application des procédés de soudage SAW, RW et PAW*, module 21, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2009, 118 p.

CEMEQ, *Application du procédé de soudage FCAW*, module 19, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2009, 92 p.

CEMEQ, *Application du procédé de soudage GMAW*, module 15, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2006, 170 p.

CEMEQ, *Application du procédé de soudage GTAW*, module 11, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2008, 136 p.

CEMEQ, *Application du procédé de soudage SMAW*, module 8, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2008, 142 p.

CEMEQ, *Coupage de métaux ferreux et non ferreux*, module 5, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2005, 158 p.

CEMEQ, *Échafaudage, levage et manutention*, compétence 7, Charpenterie-menuiserie (5319), Sherbrooke, 2009, 216 p.

CEMEQ, *Mathématiques liées à l'usinage conventionnel*, module 2, Techniques d'usinage (5223), Sherbrooke, 2009, 278 p.

CEMEQ, *Soudage de pièces d'acier à l'aide du procédé FCAW*, module 20, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2001, 132 p.

CEMEQ, *Soudage de pièces d'acier à l'aide du procédé SMAW*, module 9, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2001, 126 p.

CEMEQ, *Soudage GMAW, pièces d'acier, pièces d'aluminium*, modules 16-17, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2001, 240 p.

CEMEQ, *Soudage GTAW, pièces d'acier, pièces d'aluminium*, modules 12-13, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2001, 198 p.

CEMEQ, *Traçage de croquis et de dessins (fascicule 1)*, module 3, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2003, 114 p.

CEMEQ, *Traçage de croquis et de dessins (fascicule 2)*, module 3, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2005, 412 p.

CEMEQ, *Utilisation d'appareils de coupage et de façonnage*, module 6, Soudage-montage (5195), Sherbrooke, 2004, 290 p.

CSMOFMI, *Assistant en soudage,* [cédérom], 2003.

CSMOFMI, *Norme professionnelle relative au métier de soudeur,* 2009.

CSMOFMI, *Programme d'apprentissage en milieu de travail – Assembleur et Assembleuse de charpentes métalliques – Matériel de formation « hors production » – Manuel de l'apprenti*, 2007.

CSMOFMI, *Programme d'apprentissage en milieu de travail – Soudage-Montage – Carnet d'apprentissage*, 1997, 43 p.

CSMOFMI, *Programme d'apprentissage en milieu de travail – Soudage-Montage – Guide à l'intention du compagnon ou de la compagne d'apprentissage*, 2003, 51 p.

CSMOFMI, *Programme d'apprentissage en milieu de travail – Soudeur ou Soudeuse – Carnet d'apprentissage*, 2009, 52 p.

CSMOFMI, *Programme d'apprentissage en milieu de travail – Soudeur ou Soudeuse – Guide du compagnon*, 2009, 78 p.

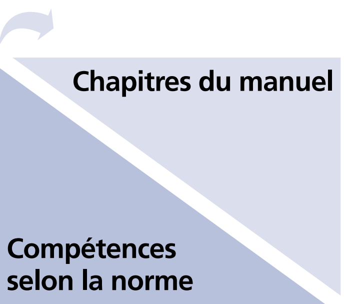
CSMOFMI, *Symbolisation en soudage,* [cédérom], 2006.

Guide d'utilisation : Les compétences requises dans le manuel

Compétences selon la norme / Chapitres du manuel	Chapitre 1 Métallurgie	Chapitre 2 Procédés de soudage (manuels et semi-automatiques)	Chapitre 3 Notions de mathéma-tique et de métrologie	Chapitre 4 Procédés de coupage, de gougeage et de chanfreinage	Chapitre 5 Déformations liées au soudage	Chapitre 6 Défauts de soudure	Chapitre 7 Lecture de plans et préparation	Chapitre 8 Techniques d'assemblage : traçage et développement de patrons
1. Planifier les travaux de soudage.								
1A. Traiter l'information.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐
1B. Choisir les méthodes et les procédés.	☐	☑	☐	☑	☑	☐	☑	☐
1C. Sélectionner l'équipement et le matériel de soudage.	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☐
2. Exécuter des travaux connexes au soudage.								
2A. Préparer les joints selon la procédure ou les spécifications.	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐
2B. Effectuer le gougeage des pièces.	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐
2C. Contrôler la température des pièces : préchauffer, maintenir la tempéra-ture entre passes et postchauffer les pièces.	☑	☐	☑	☐	☑	☐	☐	☐



Chapitres du manuel / Compétences selon la norme	**Chapitre 1** Métallurgie	**Chapitre 2** Procédés de soudage (manuels et semi-automatiques)	**Chapitre 3** Notions de mathématique et de métrologie	**Chapitre 4** Procédés de coupage, de gougeage et de chanfreinage	**Chapitre 5** Déformations liées au soudage	**Chapitre 6** Défauts de soudure	**Chapitre 7** Lecture de plans et préparation	**Chapitre 8** Techniques d'assemblage : traçage et développement de patrons
3. Appliquer un procédé de soudage manuel ou semi-automatique.								
3A. S'assurer de la qualité de la préparation des pièces à souder.	☐	☐	☑	☑	☐	☑	☐	☐
3B. Positionner les pièces et les maintenir en position, s'il y a lieu.	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☐
3D. Régler les paramètres de soudage.	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☐
3E. Appliquer les techniques de soudage.	☐	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☐
3F. Autocontrôler les soudures pendant l'opération de soudage.	☐	☐	☐	☑	☐	☑	☐	☐
4. Vérifier la qualité du travail.								
4A. Vérifier la qualité du travail après l'opération de soudage.	☐	☐	☑	☐	☑	☑	☑	☐



Chapitres du manuel / Compétences selon la norme	**Chapitre 1** Métallurgie	**Chapitre 2** Procédés de soudage (manuels et semi-automatiques)	**Chapitre 3** Notions de mathéma-tique et de métrologie	**Chapitre 4** Procédés de coupage, de gougeage et de chanfreinage	**Chapitre 5** Déformations liées au soudage	**Chapitre 6** Défauts de soudure	**Chapitre 7** Lecture de plans et préparation	**Chapitre 8** Techniques d'assemblage : traçage et développement de patrons
4. Vérifier la qualité du travail (suite).								
4B. Corriger des problèmes liés à l'application d'un procédé de soudage.	☐	☐	☐	☐	✓	✓	☐	☐
4C. Procéder au nettoyage et à la finition des pièces.	☐	☐	☐	✓	☐	☐	☐	☐

Notes : – Le chapitre 1 inclut des informations théoriques permettant, notamment, de bien comprendre et assimiler l'information contenue dans les chapitres suivants (notamment 2, 4 et 6).
– Le chapitre 8 contient les informations relatives au traçage et au développement de patrons et s'adresse plus spécifiquement aux assembleurs.

Corrigé des exercices

Exercice 1.1

1. *Figure A.1*

Quelle est la propriété qui...		Propriétés des métaux
a) permet au métal d'être allongé ou déformé sans se rompre ?	2	1. Magnétisme
b) permet au métal de reprendre sa forme après avoir été déformé ?	7	2. Ductilité
c) permet la transmission de la chaleur dans un métal ?	10	3. Résistance à la corrosion
d) facilite le façonnage d'un métal en feuille mince sous un effet de compression ?	8	4. Dureté
e) correspond à une bonne résistance à la rupture par choc ?	5	5. Ténacité
f) attire les métaux ferreux vers les aimants ?	1	6. Fragilité
g) indique la température à laquelle le métal se liquéfie ?	11	7. Élasticité
h) permet à la surface d'un métal de résister aux rayures ?	4	8. Malléabilité
i) ne supporte pas les efforts de pliage et provoque le bris du matériau lors d'un choc ou d'un impact ?	6	9. Conductivité électrique
j) permet au métal de conduire l'électricité ?	9	10. Conductivité thermique
k) permet au métal de résister à l'oxydation ?	3	11. Point de fusion

Exercice 1.2

1. *Figure A.2*

Caractéristiques		Métaux
a) Métal gris foncé, très ductile et malléable	2	1. Acier dur
b) Métal malléable résistant à la corrosion	4	2. Acier doux
c) Métal très commun, dont la teneur en carbone varie entre 0,06 et 0,2 %	2	3. Acier allié
d) Métal grandement utilisé dans la fabrication d'outils	1	4. Acier inoxydable
e) Métal malléable additionné d'éléments d'alliage lui conférant des propriétés particulières, sans en diminuer la soudabilité	3	
f) Métal dont la teneur en carbone varie entre 0,5 et 1,7 %	1	
g) Type particulier d'alliage contenant jusqu'à 30 % de chrome ou de nickel (ou les deux)	4	

2. d

3. a

4. *Figure A.3*

Effets produits		Procédés
a) Réduit les tensions internes causées par la trempe.	2	1. Trempe
b) Rend l'acier plus mou et plus facile à usiner.	3	2. Revenu
c) Rend la structure de l'acier plus homogène.	4	3. Recuit
d) Diminue la fragilité d'une pièce tout en conservant sa dureté.	2	4. Normalisation
e) Accroît la dureté et la résistance d'une pièce grâce à un refroidissement rapide.	1	
f) Permet le détrempage d'une pièce.	3	

Exercice 1.3

1. *Figure A.4*

Définitions		Métaux
a) Métal rouge-brun, ductile et malléable	2	1. Aluminium
b) Métal blanc argent pouvant s'enflammer	3	2. Cuivre
c) Alliage fait de cuivre et de zinc	4	3. Magnésium
d) Métal commun à tous les bronzes	2	4. Laiton
e) Métal léger, bon conducteur, résistant à la corrosion et plutôt économique	1	5. Nickel
f) Métal très bon conducteur d'électricité se couvrant de vert-de-gris sous l'effet de l'humidité	2	
g) Métal blanc-gris utilisé comme élément d'alliage pour augmenter la dureté et la résistance des métaux	5	

2. c

3. *Figure A.5*

Alliages		Métaux
a) Inconel	3	1. Aluminium
b) Duralumin	1	2. Cuivre
c) Bronze	2	3. Nickel
d) Monel	3	
e) Laiton	2	

Exercice 1.4

1. d – a – b – c
2. d
3. a) Vrai b) Vrai c) Faux d) Faux e) Faux
4. e
5. a

6. a) Vrai b) Faux c) Vrai d) Vrai
7. c
8. b
9. d

Exercice 2.1

1. a
2. b
3. c
4. a) Faux b) Vrai c) Faux d) Faux

Exercice 2.2

1. *Figure A.6*

Définitions		Choix de réponse
a) Type de courant qui circule toujours dans le même sens, avec la même intensité.	5	1. Polarité normale
b) Type d'ajustement sur une soudeuse permettant de conserver le courant parfaitement constant ou légèrement variable, selon le procédé utilisé.	7	2. Alternatif
c) Mode de distribution de la chaleur associé au courant alternatif	10	3. Pièce-électrode: 30 % – 70 %
d) Type de courant qui oscille et passe constamment du positif au négatif.	2	4. Soudeuse à potentiel constant
e) Type de circuit en courant continu où la pièce correspond au pôle positif.	1	5. Continu
f) Type de soudeuse à courbe horizontale	4	6. Soudeuse à courant constant
g) Mode de distribution de la chaleur associé à la polarité normale	8	7. Contrôle de l'arc
h) Type de circuit en courant continu où l'électrode correspond au pôle positif.	9	8. Pièce-électrode: 70 % – 30 %
i) Mode de distribution de la chaleur associé à la polarité inversée	3	9. Polarité inversée
j) Type de soudeuse à courbe tombante	6	10. Pièce-électrode: 50 % – 50 %

2. d

Exercice 2.3

1. *Figure A.7*

Procédé		Provenance du métal d'apport
a) SMAW	4	1. Baguette
b) GTAW	1	2. Fil à centre métallique
c) GMAW	5	3. Fil fourré avec flux
d) FCAW	3	4. Électrode enrobée
e) MCAW	2	5. Fil plein

2. c – e – f

3. a) Vrai b) Faux c) Faux d) Vrai

4. *Figure A.8*

Caractéristiques		Électrodes
a) Amorce facilement.	2	1. Cellulosique
b) Ses composants agissent comme désoxydants et éliminent le soufre et le phosphore du métal fondu.	3	2. Rutile
c) Produit un arc fort, directionnel et une forte pénétration.	1	3. Basique
d) Produit un cordon de soudure à l'apparence rugueuse et des stries démarquées.	1	
e) N'émet aucun gaz dans l'arc.	2	
f) Produit une pénétration moyenne et une couche de laitier de faible à moyenne.	3	

5. La pénétration, la stabilité de l'arc, la présence d'oxydation en surface, le mouillage et les propriétés mécaniques du cordon.

6. *Figure A.9*

Propriétés		Gaz de protection
a) Gaz ayant un potentiel d'ionisation élevé (haute tension) et créant des soudures larges.	3	1. Argon (Ar)
b) Gaz qui possède une grande solubilité dans les métaux en fusion et qui, combiné à d'autres, procure un bon mouillage pour le soudage de l'acier.	5	2. Gaz carbonique (CO_2)
c) Gaz possèdant un potentiel d'ionisation bas et causant beaucoup de soufflage de l'arc mais peu de projections.	1	3. Hélium (He)
d) Gaz oxydant et carburant mais qui diminue la stabilité de l'arc; utilisé seulement avec l'acier au carbone et faiblement allié.	2	4. Hydrogène (H)
e) Gaz réducteur se combinant à d'autres gaz, notamment pour le soudage de l'acier inoxydable.	4	5. Oxygène (O_2)

Exercice 2.4

1. *Figure A.10*

Caractéristiques		Mode de transfert
a) Mode de transfert nécessitant deux intensités de courant distinctes	4	1. Court-circuit
b) Mode de transfert transférant une faible quantité de chaleur à la pièce, occasionnant moins de déformations	1	2. Transfert globulaire
c) Mode de transfert déposant, sous l'effet de la gravité, de grosses gouttelettes pour former le cordon de soudure	2	3. Pulvérisation axiale
d) Mode de transfert exclusif au procédé GMAW	1	4. Pulsé
e) Mode de transfert presque toujours utilisé pour le soudage de métaux non ferreux	3	
f) Mode de transfert permettant une grande pénétration, mais avec un risque de projections élevé	2	
g) Mode de transfert déposant de fines gouttelettes pour former le cordon de soudure	3	
h) Mode de transfert qui permet au bain de fusion de refroidir entre chaque déposition de métal, limitant ainsi les déformations	4	

Exercice 2.5

1. a) 1 – 3 – 5 – 12 – 14 b) 1 – 4 – 7 – 9 – 11 – 13 c) 1 – 2 – 6 – 7 – 8 – 10 – 11 – 13
   d) 2 – 6 – 8 – 10 – 13 – 15 e) 1 – 2 – 5 – 6 – 8 – 10 – 14

2. *Figure A.11*

Applications			Procédé
a)	Construction aéronautique	2 et 3	1. SMAW
b)	Fabrication de grosses pièces (ponts, réservoirs, turbines, etc.)	4 et 5	2. GTAW
c)	Réparations	1 et 4	3. GMAW
d)	Procédé extrêmement répandu dans tous les domaines de fabrication	3	4. FCAW
e)	Fabrication de petites pièces	2	5. MCAW
f)	Soudage à l'extérieur	1 et 4	

3. *Figure A.12*

	CCPN	CCPI
a) SMAW	☐	☑
b) GTAW	☑	☐
c) GMAW	☐	☑
d) FCAW	☐	☑

4. c
5. d
6. Le diamètre des baguettes d'apport doit être plus petit que l'épaisseur des pièces à souder.
7. La composition du métal de base, le degré de résilience requis, l'état de la surface des pièces et le type de gaz de protection utilisé.

8. *Figure A.13*

Gaz ou mélange de gaz de protection		Procédé
a) Argon-gaz carbonique-hydrogène	2	1. MIG
b) Hélium-argon	1	2. MAG
c) Argon	1	
d) Argon-oxygène	2	

9. *Figure A.14*

Applications		Mode de transfert
a) Soudage de tôles épaisses	3	1. Court-circuit
b) Soudage en position des aciers	1	2. Transfert globulaire
c) Mode de transfert le plus polyvalent, s'adapte à presque tous les types de travaux.	4	3. Pulvérisation axiale
d) Soudage à grande pénétration avec CO_2 comme gaz de protection	2	4. Pulsé

10. a) Vrai b) Faux c) Faux d) Vrai

Exercice 2.6

1. a) 2 – 3 – 4 – 6 – 9 – 11 b) 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 9 – 12 c) 1 – 2 – 4 – 5 – 7 – 8 – 10 – 12
d) 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 7 – 8 – 10 – 11 – 12

2. *Figure A.15*

Variations de paramètres		Résultats
a) Augmentation de l'intensité du courant	1, 2 et 3	1. Augmentation de la pénétration
b) Augmentation de la vitesse d'avance	4	2. Cordon plus large
c) Utilisation du courant à polarité normale	2	3. Cordon plus épais
d) Utilisation du courant à polarité inversée	1	4. Cordon moins épais

3. *Figure A.16*

Variations de paramètres		Résultats
a) Diminution de l'intensité du courant	4	1. Augmentation de la pénétration
b) Diminution de la vitesse d'avance	1, 2 et 3	2. Cordon plus large
c) Utilisation du courant à polarité normale	1	3. Cordon plus épais
d) Utilisation du courant à polarité inversée	2	4. Cordon moins épais
e) Augmentation de la longueur d'arc	2 et 4	

4. *Figure A.17*

Variations de paramètres		Résultats
a) Augmentation de l'intensité du courant	1, 2 et 3	1. Augmentation de la pénétration
b) Diminution de tension	3	2. Cordon plus large
c) Augmentation de la vitesse d'avance	4	3. Cordon plus épais
d) Diminution de la longueur terminale	1, 2 et 4	4. Cordon moins épais
e) Soudage en poussant	3	
f) Soudage en tirant	1 et 3	

Exercice 3.1

1. a) 118,2 mil   b) 19,7 mil
   c) 76,2 mm   d) 20,32 mm

2. a) 212,0 °F   b) 990,5 °F
   c) 20,0 °C   d) 4416,67 °C

Exercice 3.2

1. a) 8   b) 32

2. a) $\frac{11}{16}$ b) $\frac{3}{16}$

Exercice 3.3

1. c
2. a

Exercice 3.4

1. a) 0,750 po b) 0,625 po c) 0,219 po

Exercice 3.5

1. 1 – b 2 – f 3 – c
2. 1 – b 2 – a 3 – c 4 – b 5 – c 6 – a

Exercice 3.6

1. a
2. d
3. b
4. a
5. c

Exercice 3.7

1. a) 11,43 b) 3,814 c) 79,480
2. b

Exercice 3.8

1. *Figure A.18*

Mesures		Intervalles
a) $4,5 \pm 0$	8	1. 4,0 et 4,5
b) $7^{+1,2}_{-0,3}$	6	2. 8,0 et 10,0
c) $9 \pm 1,0$	2	3. 3,5 à 5,5
d) $4,5^{+1}_{-1}$	3	4. 8,0 et 9,0
e) 9^{+0}_{-1}	4	5. 2,6 et 3,1
f) $3^{+0,2}_{-0,3}$	7	6. 6,7 et 8,2
g) $8^{+0,5}_{-0,5}$	9	7. 2,7 et 3,2
h) $4^{+0,5}_{-0}$	1	8. 4,0 à 5,0
i) $2,7^{+0,4}_{-0,1}$	5	9. 7,5 à 8,5

Exercice 4.1

1. *Figure A.19*

Opérations à réaliser		Techniques de nettoyage
a) Correction des défauts de perçage	3	1. Meulage
b) Correction d'imperfections des coupes	1	2. Martelage
c) Dégrossissage	4	3. Burinage
d) Élimination des scories	2	4. Limage
e) Polissage	4	
f) Nettoyage de coins de rainures	3	

2. a – c – d

3. c

4. *Figure A.20*

Caractéristiques		Gaz
a) Gaz permettant l'oxycoupage sous l'eau.	6	1. Oxygène (O_2)
b) Gaz économique et pratique, mais présentant un grand risque de retour de flamme.	3	2. Acétylène
c) Gaz comburant qui sert à couper le métal.	1	3. Gaz naturel
d) Gaz plus lourd que l'air, dont les bonbonnes se manipulent facilement et qui possède une longue durée d'utilisation.	5	4. MAPP
e) Le plus stable des gaz combustibles, il est aussi très économique et tolère des pressions élevées.	4	5. Propane
f) Gaz qu'on ne doit utiliser qu'à des pressions inférieures à 103 kPa à cause des risques d'explosion élevés.	2	6. Hydrogène (H_2)

5. e

6. *Figure A.21*

Caractéristiques		Procédés
a) Procédé relativement économique	1	1. Oxycoupage
b) Procédé qui utilise un gaz carburant et un gaz oxydant	1	2. Coupage au jet de plasma
c) Procédé permettant de couper tous les types de métaux	2	
d) Procédé utilisant l'air comprimé	2	
e) Procédé rapide et précis qui ne requiert pas de préchauffage	2	
f) Procédé permettant de couper les métaux ferreux contenant jusqu'à 1,97 % de carbone	1	

7. *Figure A.22*

Propriétés		Gaz
a) Gaz permettant de couper l'acier inoxydable et la plupart des métaux non ferreux.	2	1. Air comprimé
b) Gaz très utilisé pour le coupage de l'aluminium et qui procure aussi une grande vitesse de coupe.	4	2. Azote
c) Gaz plus froid qui produit des coupes de qualité supérieure.	3	3. Argon
d) Gaz le plus répandu, très économique, mais qui coupe surtout des plaques de moins de 25 mm d'épaisseur.	1	4. Mélange argon-hydrogène

8. *Figure A.23*

Paramètres		Procédés
a) État de la tuyère	2	1. Oxycoupage
b) Ajustement de la pression des gaz	3	2. Au jet de plasma
c) Période de refroidissement après la coupe	4	3. Les deux
d) Vitesse d'avance	3	4. Aucun des deux
e) Préchauffage approprié	1	
f) Couleur du métal	4	
g) Choix de la tête de coupe	1	

9. a – b – d – f

10. *Figure A.24*

Paramètres		Défauts
a) Flamme de chauffe trop puissante	1 et 3	1. Gorge à la partie supérieure de la coupe
b) Vitesse trop lente	3, 4 et 5	2. Grand retard lors de l'amorçage
c) Vitesse trop rapide	2, 5 et 6	3. Fusion d'arêtes
d) Vitesse d'avance	3	4. Arrachement du métal
e) Mauvaise intensité du courant	3, 5 et 6	5. Formation excessive de scories
f) Trop de pression	4	6. Pénétration insuffisante
g) Pièce d'équipement endommagée ou encrassée (tête de coupe, tuyère ou électrode)	5 et 6	

Exercice 4.2

1. b – d

2. *Figure A.25*

Types de plaques		Types de préparation des bords
a) Plaque épaisse de duralumin (alliage d'aluminium)	2	1. Joints en chanfrein
b) Tôle mince d'acier à souder bout à bout à l'aide du procédé SMAW	4	2. Joints en J ou en U
c) Plaque d'acier de moyenne épaisseur	1	3. Préparation à bords relevés
d) Tôle mince à souder bout à bout à l'aide du procédé GTAW	3	4. Préparation à bords droits
e) Assemblage en L de plaques d'acier	1	
f) Assemblage en T de plaques épaisses d'aluminium	2	
g) Tôle mince de laiton à souder bout à bout à l'aide du procédé GMAW	4	

3. b – c – f

4. a – c – d – e

5. a) Vrai b) Faux c) Vrai d) Vrai

6. *Figure A.26*

Techniques de nettoyage		Types de saletés
a) Brossage à l'aide d'une brosse métallique	2 et 3	1. Matière grasse
b) Préchauffage	4	2. Couche de peinture
c) Meulage	3	3. Rouille
d) Au chalumeau	2	4. Calamine
e) À l'aide d'un solvant	1	
f) Martelage	3	
g) Nettoyage à la vapeur	1	

Exercice 5.1

1. *Figure A.27*

Descriptions		Types de déformation
a) La longueur de la pièce diminue après chauffage.	2	1. Retrait transversal
b) Lors du chauffage, les bords de la plaque se rapprochent.	1	2. Retrait longitudinal
c) Constitue le résultat d'un processus de dilatation/retrait bloqué par des contraintes.	5	3. Déformation angulaire
d) À la suite du chauffage, l'assemblage penche vers la zone de soudure.	3	4. Gondolement
e) Les bords prennent une forme d'accordéon.	4	5. Tensions internes

2. a) Vrai b) Faux c) Vrai d) Vrai e) Faux

Exercice 5.2

1. a – c – f
2. b
3. d

4. e
5. a) Faux b) Vrai c) Vrai d) Vrai e) Faux
6. b – c
7. b
8. a
9. b
10. a – c – e

Exercice 5.3

1. *Figure A.28*

Méthode ou préparation		Types de déformation à éviter
a)	3	1. Retrait transversal
b) Insertion d'un coin à l'extrémité d'un joint long entre des plaques	1	2. Retrait longitudinal
c) Soudure multipasse	2	3. Déformation angulaire
d) Positionnement préalable de la pièce dans le sens opposé à la soudure	3	
e)	1	

2. a – b – c – e

Exercice 6.1

1. Le préchauffage, la préparation des joints et le choix du métal d'apport
2. a – d
3. a) Vrai b) Faux c) Vrai d) Faux e) Vrai

Exercice 6.2

1. *Figure A.29*

Paramètres		Défauts
a) Vitesse de soudage trop lente	8	1. Soufflures
b) Métal d'apport incompatible avec le métal de base	7	2. Manque de pénétration
c) Intensité du courant ou chaleur trop élevée	5, 6 et 7	3. Cordon trop étroit
d) Impuretés dans le bain de fusion	4 et 7	4. Inclusions de laitier
e) Intensité du courant trop faible	1 et 2	5. Projections
f) Arc instable	5	6. Caniveaux
g) Vitesse de soudage trop rapide	1, 2 et 3	7. Retassures
h) Joints trop étroits	2 et 7	8. Effondrement

2. *Figure A.30*

Définitions ou illustrations		Défauts
a)	3	1. Retassure à la racine
b) Défaut souvent sphérique causé par la présence de gaz dans la soudure	9	2. Collage à la racine
c)	7	3. Manque de pénétration
d) Gouttelettes de métal d'apport jaillissant et se déposant sur le métal de base, autour du cordon	8	4. Inclusion
e)	2	5. Trou
f) Perforation de la soudure généralement causée par un chauffage local trop intense	5	6. Surépaisseur du cordon
g) Corps solide étranger	4	7. Excès de pénétration
h) Cordon plus épais que les dimensions prescrites ou que les normes tolérées	6	8. Projections
i)	1	9. Soufflures

Exercice 7.1

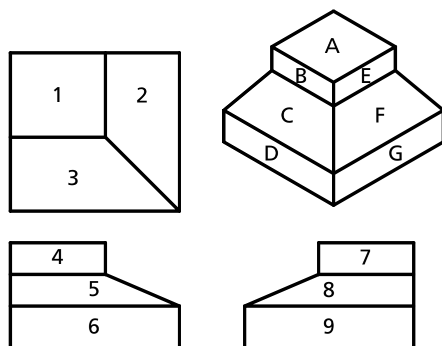
1. b
2. c
3. c
4. c
5. a
6. a
7. a
8. d
9. c
10. c

Exercice 7.2

1. *Figure A.31*

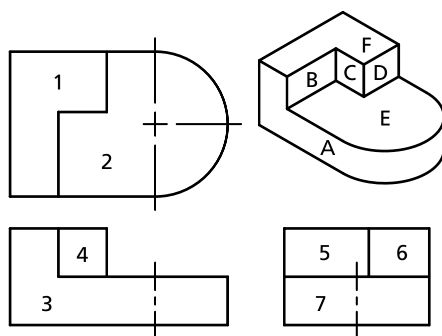
Définitions ou illustrations		Types de vue
a) Correspond à la face de dessus d'une projection orthogonale.	4	1. Projection orthogonale
b) [illustration]	6	2. Vue en élévation
c) Correspond à la face avant (au centre) d'une projection orthogonale.	2	3. Vue de profil
d) [illustration]	5	4. Vue en plan
e) Perspective permettant de visualiser les côtés d'un objet comme si on le regardait à 90° par rapport à la ligne de vision.	1	5. Projection orthogonale américaine
f) Correspond à la face de côté d'une projection orthogonale.	3	6. Projection orthogonale européenne

2. a) *Figure A.32*



1 : A	4 : B	7 : E
2 : F	5 : C	8 : F
3 : C	6 : D	9 : G

b) *Figure A.33*



1 : F	4 : C	7 : A
2 : E	5 : B	
3 : A	6 : D	

Exercice 7.3

1. a – c – e – f – g

2. a) Soudure bout à bout avec plaque de support sur préparation en demi-V
   b) Au pôle positif
   c) On devrait choisir une électrode de plus grand diamètre.
   d) 126 A et 154 A
   e) Soudage bout à bout avec plaque de support

3. a) Épaisseur : min. 1,6 mm et max 1,6 mm ; largeur : min. 5,0 mm et max. 6,0 mm
   b) EWZr–1 ; parce que les alliages de zirconium sont recommandés pour le soudage de l’aluminium.
   c) Le courant alternatif haute fréquence parce que c’est le meilleur choix pour le soudage de l’aluminium.
   d) 9 mm ; du diamètre de l’électrode, de l’intensité du courant, du type de joints
   e) De l’argon ; il est essentiel d’utiliser un gaz inerte pour éviter l’oxydation.

4. a) On augmenterait la longueur terminale du fil-électrode.
   b) Verticale
   c) Par pulvérisation axiale parce que c’est le mode de transfert le plus courant pour le soudage de métaux non ferreux.
   d) MIG

5. a) 6
   b) 10 mm

c) Le CO_2 ou un mélange d'argon et de CO_2, parce que celui-ci est essentiel à l'utilisation du mode de transfert globulaire.
d) 6980 à 7080 mm/min

6. a) Gougeage à l'arc-air
b) 6,4 - 5
c) 1
d) Globulaire, parce que ce mode permet une grande pénétration et un soudage rapide.

Exercice 7.4

1. *Figure A.34*

Définitions ou illustrations		Signification
a) CIRC	6	1. Symétrie
b) ℄	8	2. Tolérance
c) ⌭	4	3. Acier roulé à froid
d) CRS	3	4. Cylindricité
e) [A] [A]	10	5. Longueur
f) TOL	2	6. Circonférence
g) ⌯	1	7. Inclinaison
h) ⌒	9	8. Ligne centrale
i) ∠	7	9. Profil de ligne
j) LG	5	10. Élément de référence

2. a) Il indique le rayon de la courbe D en pouces.
b) 11 mm
c) 0,125 po/100 po ou 0,125 %
d) Parallèles avec une déviation maximale de 0,125 po/100 po ou 0,125 %
e) Oxycoupage
f) Soudure d'angle sur préparation en demi-V de 0,19 po de grosseur effectuée tout autour

3. a) A : à plat horizontale ; B : verticale montante
   b) Aucune
   c) 5 mm
   d) 232 mm

Exercice 8.1

1. *Figure A.35*

Fonctions		Instruments de traçage
a) Outil très polyvalent convenant à de multiples utilisations.	6	1. Trusquin
b) Tracer des lignes à 45° par rapport au bord d'une pièce et trouver le centre d'une pièce carrée.	3	2. Équerre de charpente
c) Trouver le centre d'une pièce circulaire.	5	3. Équerre à 45°
d) Tracer des lignes droites ainsi que des angles de 90° ou complémentaires.	2	4. Rapporteur d'angles
e) Tracer des lignes parallèles au bord d'une pièce.	1	5. V à centrer
f) Tracer des lignes suivant différents angles sur une pièce.	4	6. Équerre combinée

1. a – c – d – e
2. c
3. d



FICHE DE RÉTROACTION

– Merci de votre précieuse collaboration –

Pour nous faire part de vos suggestions de corrections, si ces corrections sont courtes, utilisez la fiche ci-dessous ou écrivez-les à l'encre rouge sur une photocopie des pages concernées et faites-les-nous parvenir. Si les corrections sont nombreuses, écrivez-les directement dans le document original et faites-le-nous parvenir; nous serons heureux de vous transmettre un exemplaire en retour.

Dans tous les cas, veuillez accompagner votre envoi de cette fiche pour que nous puissions vous contacter au besoin.

Coordonnées du CSMOFMI : 1, Place du Commerce, Bureau 410
Ile-des-Sœurs (Québec) H3E 1A2

Nom : ______________________

Établissement : ______________________

Coordonnées : ______________________

____

Titre du document : ______________________

Page	Nature du problème	Solution proposée

Page	Nature du problème	Solution proposée

Commentaires :